

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Государственный университет имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи



Котов Павел Игоревич

**КОМПРЕССИОННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ
МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ОТТАИВАНИИ (ЕВРОПЕЙСКИЙ СЕВЕР
РОССИИ, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)**

Специальность

25.00.08 – инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д.г.-м.н., профессор Л.Т. Роман

Москва
2014

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Обобщение результатов исследований деформаций оттаивающих грунтов.....	9
1.1. Основные закономерности формирования осадок оттаивающих грунтов ..	10
1.2. Приборы и оборудование для исследования деформационных свойств оттаивающих грунтов	15
1.3. Деформирование оттаивающих грунтов.	18
1.4. Уравнения для расчета осадки оттаивающих грунтов	21
1.5. Расчет осадок оттаявших грунтов на основе опытных значений деформационных характеристик	27
Выводы	32
Глава 2. Состав и свойства исследуемых грунтов	34
Выводы	41
Глава 3. Методика исследований и обработки опытных данных	42
3.1. Экспериментальные исследования.....	42
3.2. Математическое моделирование	52
3.3. Прогноз деформаций оттаивающих грунтов.....	58
Выводы	67
Глава 4. Закономерности изменения деформационных характеристик и физических свойств образцов в зависимости от условий оттаивания	68
4.1. Деформационные характеристики	68
4.2. Плотность и влажность.....	79
4.3. Коэффициент вязкости	84
Выводы	86
Глава 5. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния оттаивающих грунтов методом математического моделирования.....	87
5.1. Сравнение деформационных характеристик, полученных в лабораторных и полевых условиях.....	91
Выводы	94

Глава 6. Расчетные методы прогноза деформаций оттаивающих грунтов и предложения по экспресс методике их определения.	95
6.1. Прогноз деформационных характеристик на основе параметрических уравнений	95
6.2. Расчетные формулы для прогноза осадок	102
6.3. Экспериментально-расчетный метод прогноза осадок.....	110
Выводы	120
Заключение	122
Список литературы	124
Приложение	137

Введение

Исследование свойств оттаивающих грунтов не теряет своей актуальности в связи с интенсивным освоением районов криолитозоны. Исследования, посвященные оттаивающим грунтам, важны во многих областях гражданского и промышленного строительства, которые необходимы для обеспечения надежности эксплуатации объектов, построенных по второму принципу (грунты основания используются в оттаянном или оттаивающем состоянии), трубопроводов и дорог в криолитозоне.

Ввиду многокомпонентности состава мерзлых грунтов, отличий условий оттаивания, а также зависимости осадки при оттаивании от многих факторов, прогноз деформаций является достаточно сложной задачей, требующей дальнейших усовершенствований, направленных на повышение достоверности определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов и закономерностей их изменения. Основным методом исследования оттаивающих грунтов являются лабораторные компрессионные испытания, которые трудоемки и продолжительны. В связи с этим актуальной задачей является разработка экспресс методов определения деформационных характеристик и прогноза осадок.

Испытания для определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов проводились в компрессионных приборах, обеспечивающих одностороннее оттаивание, так как при этом соблюдается условие одномерной задачи (равномерного сжатия без возможности бокового расширения). Именно для этого метода и были разработаны методы прогноза осадок. Однако, при большом объеме изыскательских работ это требование мало осуществимо ввиду трудоемкости и длительности опытов, поэтому определение деформационных характеристик выполняется в условиях всестороннего оттаивания. В связи с этим, одной из проблем механики оттаивающих грунтов является установление сопоставимости деформационных характеристик по обеим методикам их определения.

Цель работы: на основе экспериментальных и теоретических исследований

установить закономерности деформирования оттаивающих дисперсных грунтов в зависимости от условий оттаивания и уплотнения с разработкой предложений по экспресс методике определения деформационных характеристик и осадок.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Обобщить результаты исследований осадок оттаивающих грунтов во времени в зависимости от факторов их обуславливающих, а также данные о существующих методах расчета осадок.

2. Разработать комплексную методику исследований, включающую экспериментальные исследования, математическое моделирование, прогнозную оценку деформационных характеристик.

3. Провести экспериментальные исследования осадок при оттаивании различных видов грунтов заданной криогенной текстуры в условиях одностороннего и всестороннего оттаивания, с определением изменения деформационных характеристик и физических свойств грунта в процессе оттаивания и уплотнения.

4. Провести математическое моделирование по программе «Termoground» процесса деформирования грунтов при различных условиях оттаивания и видах испытаний (лабораторного и полевого).

5. Выявить применимость параметрических уравнений для прогноза деформаций оттаивающих грунтов в условиях компрессии.

6. Обобщить результаты компрессионных испытаний оттаивающих грунтов ненарушенного строения, отобранных в различных региональных мерзлотно-грунтовых условиях, с целью разработки методов прогноза деформационных характеристик.

7. На основе проведенных исследований разработать предложения по экспресс методике определения деформационных характеристик и осадок оттаивающих грунтов.

Комплексный подход к решению поставленных задач, значительный объем фактических данных обеспечивают надежность и обоснованность полученных результатов.

Научная новизна работы

1. Установлены закономерности деформирования различных видов оттаивающих грунтов в зависимости от их физических свойств, условий оттаивания на основе комплексных исследований, включающих экспериментальное изучение осадок грунтов в условиях всестороннего и одностороннего оттаивания, численные расчеты по программе «Termoground», выполненные для различных условий оттаивания и видов испытаний (лабораторных и полевых).

2. Показан диапазон применения параметрических уравнений механики твердых тел, получены их параметры для прогноза деформаций оттаивающих грунтов в условиях компрессии.

3. Установлены зависимости деформационных характеристик оттаивающих грунтов от физических свойств на основе обобщения данных более 500 экспериментов различных видов грунтов ненарушенного сложения, отобранных на севере Европейской части России, Западной Сибири.

4. Разработаны предложения по экспресс методике определения осадок оттаивающих грунтов на основе данных экспериментальных и теоретических исследований.

Защищаемые положения

1. Комплексная методика, включающая экспериментальные исследования, математическое моделирование по программе «Termoground», прогноз деформаций в условиях компрессии с помощью параметрических уравнений.
2. Закономерности компрессионного деформирования грунтов при разных условиях оттаивания.
3. Установленные на основе регрессионного анализа зависимости характеристик оттаивающих грунтов от их состава и свойств.
4. Предложения по экспресс методике определения деформационных характеристик и осадок оттаивающих грунтов и пределы ее применимости.

Практическая значимость работы

Результаты исследований рекомендуются для прогноза осадок мерзлых

грунтов при оттаивании оснований инженерных сооружений, возводимых в криолитозоне, для усовершенствования методики испытаний при инженерных изысканиях (сокращения сроков и уменьшения трудоемкости испытаний), а также при актуализации нормативных документов.

Личный вклад автора

Автором выполнено более 500 компрессионных испытаний различных видов оттаивающих грунтов ненарушенного сложения с целью получения закономерностей компрессионного деформирования, использованные для разработки предложений по экспресс методике определения осадок, и около 350 опытов на модельных образцах для выявления влияния условий оттаивания на деформационные характеристики, плотность, влажность. Выполнены расчеты по программе «Termoground» для прогноза влияний условий оттаивания на значения осадок, а также сравнение данных лабораторных и полевых испытаний. Получены данные о возможности применения параметрических уравнений для прогноза деформаций при оттаивании.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы изложены в тезисах докладов, а также в статьях журналов, рекомендованных ВАК (3 публикации). Основные положения работы доложены и обсуждены на Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2010» (г. Москва, 2010), Генеральной ассамблее европейского союза по наукам о Земле (г. Вена, 2011), IV Конференции геокриологов России (г. Москва, 2011), Межрегиональном форуме «Международное сотрудничество молодых ученых: северное измерение» (Архангельск, 2011), Научной конференции «Ломоносовские чтения» (г. Москва, 2012), VI Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2012), X Международной конференции по мерзлотоведению (Салехард, 2012), Международной конференции по криосфере (Санья, 2012), III Всероссийском научном молодежном форуме геокриологов (Якутск, 2013), I Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Наука о Земле. Современное состояние» (полигон Шира, 2013), Международной конференции

«Криология Земли: 21 век» (Пушино, 2013), V Международной конференции молодых ученых и специалистов «Фундаментальная и прикладная геологическая наука: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения» (Баку, 2013), XIV Международной научной конференции студентов и аспирантов «Проблемы арктического региона» (Мурманск, 2014).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 работы в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация общим объемом 149 страниц состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 49 рисунков и 32 таблицы. Список литературы включает 133 наименования из них 43 на английском языке.

Благодарности

Работа выполнена на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в период обучения автора в магистратуре и аспирантуре под руководством доктора геолого-минералогических наук, профессора Л.Т. Роман, которой автор выражает искреннюю благодарность за постоянную и всестороннюю помощь в работе над диссертацией и внимание. Автор благодарит к.г.-м.н. М.Н. Царапова за постоянное участие, помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор выражает признательность д.г.-м.н. А.В. Брушкову, д.г.-м.н. И.А. Комарову, д.т.н. Л.Н. Хрусталеву, д.г.-м.н. Л.С. Гарагуле, д.г.-м.н. В.Г. Чевереву, к.г.-м.н. В.З. Хилимонюк, к.г.-м.н. С.С. Волохову, к.г.-м.н. Р.Г. Мотенко за полезные советы и замечания, способствовавшие выполнению данной работы, д.т.н. И.И. Сахарову, д.т.н. В.Н. Парамонову, к.т.н. М.В. Парамонову за консультации. Автор благодарит за помощь в проведении экспериментов Семиколенову Л.Г., Шередеко Н.С., а также всех сотрудников кафедры геокриологии, родных и друзей за поддержку и понимание.

Глава 1. Обобщение результатов исследований деформаций оттаивающих грунтов

Практически за столетний период накоплен большой объем исследований деформационных свойств мерзлых грунтов при оттаивании и уплотнении. Исследованиями оттаивающих грунтов занимались как отечественные (Н.А. Цытович, Г.И. Лапкин, А.Е. Федосов, В.П. Ушкалов, С.С. Вялов, Я.А. Кроник, Л.Т. Роман, Ю.К. Зарецкий, М.Н. Гольдштейн, И.Н. Вотяков, В.Ф. Жуков, Г.В. Порхаев, Л.Н. Хрусталева, Е.П. Шушерина, Г.И. Пахомова, А. М. Пчелинцев, М.Ф. Киселев, В.Д. Пономарев, Э.Д. Ершов, В.З. Хилимонюк и др.), так и зарубежные (Morgenstern N. R., Smith L. B., Croy F., Chamberlain E. J., Gow, Luscher A. J., McRoberts E.C., Harris C, Nixon J. F., Eigenbrod K. D., Keil L.D., Nilsen N.M., Gupta R.C., Speer T.L., Watson G.H., Ryde'n C.G. и др.) ученые.

Научно-исследовательская работа по изучению поведения грунтов при оттаивании сосредоточена, главным образом, на следующих основных направлениях:

- 1) исследования, в которых рассматриваются процессы, происходящие в грунтах при оттаивании, а также влияние этого процесса на физические и механические свойства грунтов;
- 2) исследования, посвященные расчету и прогнозированию осадок мерзлых грунтов при оттаивании;
- 3) разработка методики определения механических свойств оттаивающих грунтов.

По первому направлению выявлено, что осадка грунтов при оттаивании в значительной степени зависит от влажности, плотности, вида грунта, криогенной текстуры, минерального состава, изменения коэффициента фильтрации, скорости оттаивания, условий оттока влаги, условий проведения испытаний (компрессионные или трехосные), размеров образца.

По второму направлению определились два основных подхода к расчету осадок мерзлых грунтов при оттаивании. Первый – это расчетный (по физическим характеристикам), на основе которого получено около 15 зависимостей осадки

оттаивающих дисперсных грунтов от показателей физических свойств. Второй – это экспериментальный, с определением коэффициентов оттаивания и сжимаемости в полевых и лабораторных условиях.

Основные исследования, посвященные методикам определения деформационных характеристик, были выполнены в прошлом столетии, на их основе были разработаны нормативные документы по полевому и лабораторному определению деформационных свойств оттаивающих грунтов.

1.1. Основные закономерности формирования осадок оттаивающих грунтов

На основе опытных данных Г.И. Лапкин [50] предложил метод расчета осадок, основанный на разделении осадок грунта на два слагаемых: осадку оттаивания и обжатия. Н. А. Цытович [86] на основе экспериментальных исследований осадок оттаивающих грунтов в компрессионных условиях разработал методику определения деформационных характеристик (коэффициента оттаивания и сжимаемости), повсеместно используемых и в настоящее время [88, 90]. Н.А. Цытович проводил все исследования в специально разработанном приборе (одомере), в котором выполняется условие плоскопараллельного оттаивания.

Компрессионные испытания являются самым распространенным методом исследования оттаивающих грунтов, на основе данных которых выявлены закономерности влияния различных свойств грунтов на осадку.

Основные результаты исследований осадок оттаивающих грунтов сводятся к следующему.

Выявлено, что условия промерзания в значительной степени влияют на свойства грунтов при оттаивании. Так, при промерзании влажных дисперсных грунтов происходит нарушение естественной и формирование новой криогенной структуры и текстуры. Этот процесс обусловлен, прежде всего, увеличением в объеме замерзающей влаги, что создает внутри поровое давление, уплотняющее грунтовые агрегаты. Образуются ледяные включения (прослойки, линзы), которые при медленном промерзании, сопровождающемся миграцией влаги,

могут достигать значительных размеров, формируя различные криогенные текстуры. Промерзание переувлажненных глинистых грунтов сопровождается рядом физико-химических процессов: свертыванием грунтовых коллоидов, агрегированием глинистых частиц. Все это приводит к изменению структуры грунта [25,28,92,106,122]. Поведение грунта при оттаивании, его деформационные характеристики зависят от многих факторов, одним из главных является формирование новых свойств при промерзании, что отмечается многими исследователями [8, 26, 40, 67, 74, 88, 89, 93].

Развитие деформаций при оттаивании грунтов в лабораторных условиях обусловлено двумя факторами:

- внутренними (строение, физические свойства грунтов);
- внешними (скорость оттаивания, условия дренажа, нагрузка).

Многими исследователями выявлены зависимости от основных определяемых для всех грунтов характеристик - плотности и влажности. Установлено, что с увеличением плотности грунта осадки при оттаивании уменьшаются, а с увеличением влажности и льдистости – увеличиваются. На основе этих данных были получены зависимости осадок от физических свойств грунтов, которые рассмотрены в разделе 1.4.

Выявлены зависимости не только между осадкой и физическими свойствами, но и между деформационными характеристиками и физическими свойствами. Установлены линейная зависимость коэффициента оттаивания от влажности и экспоненциальная – для коэффициента сжимаемости от влажности при определенном давлении [98]. Другими авторами получена корреляция между деформационными показателями и плотностью, влажностью [44, 46, 99,111, 113].

Л.В. Чистотинов [22] исследовал сильнольдистые лессовидные супеси и суглинки естественного сложения, отобранные на севере европейской территории России (суммарная влажность грунта 45 – 150%) в условиях небольших нагрузок (0,01 – 0,025 МПа). Результаты этих экспериментов представлены в виде зависимостей относительной осадки от начальной влажности.

Результаты испытаний по осадке оттаивающих пылеватых грунтов,

отобранных на участке предполагаемой трассы Арктического газового трубопровода (Канада, Альберта) показали, что осадка образцов, отличающихся друг от друга по размерам в 1, 3 и 23 раза, отличается не более 10% [113].

Для выявления влияния разуплотнения образца при отборе с большой глубины проведены исследования, как на монолитах, так и искусственно приготовленных образцах в лабораторных условиях. Получено, что разуплотнение образца может значительно повлиять на данные лабораторных исследований в связи со значительным уплотнением грунта под действием собственного веса и нарушением структуры при разгрузке [59, 123].

Деформирование оттаивающих грунтов одного и того же литологического состава в значительной степени зависит от типа и вида криогенной текстуры [26, 27]. При оттаивании происходит неполное смыкание пор и образование посткриогенных текстур, которые в значительной степени определяют значения осадки грунта [77].

Большая скорость осадок оттаивающего грунта объясняется его высокой водопроницаемостью. Результаты исследований показывают, что коэффициенты фильтрации оттаявших грунтов значительно выше коэффициентов фильтрации этих же грунтов в талом состоянии, так как при оттаивании сохраняется посткриогенная текстура, что приводит к увеличению их фильтрационных свойств. Исследования показали, что процесс замораживания и оттаивания существенно влияет на фильтрационные свойства дисперсных грунтов [62, 63, 64, 82, 94, 95, 102, 108, 126, 128, 129]. Коэффициент фильтрации после оттаивания увеличивается в несколько раз, а может на несколько порядков [96, 100; 131]. Однако в бентонитовой глине и в песчано-бентонитовых смесях коэффициент фильтрации остается постоянным после двух циклов замораживания и оттаивания [97].

Кроме этого, при оттаивании происходит изменение порового давления, значение которого является составляющим уравнения для расчета осадок грунта по теории фильтрационной консолидации. Исследования Н.А. Цытовича [87] показали, что в момент прохождения границы оттаивания поровое давление

достигает практически полной величины нагрузки. По мере прохождения границы оттаивания давление снижается до некоторой величины и остается постоянным, но меньше полной приложенной нагрузки. В течение всего периода оттаивания рассеивание порового давления в процессе фильтрации постоянно компенсируется непрерывно возникающим давлением на границе оттаивания. При малой и средней степени водонасыщения в глинистых грунтах оттаивание происходит без возникновения избыточного порового давления [84].

Избыточное поровое давление воды и осадки были рассчитаны на основе теории фильтрационной консолидации для двух случаев: без нагрузки и под собственным весом. На основе этого подхода многими авторами рассчитывалось поровое давление [112, 120; 121]. Анализ 20 летних наблюдений за изменением порового давления на трубопроводе Норманн Уэллс показали, что природное поровое давление ниже расчетного [117].

Исследование порового давления является трудной задачей [102, 103, 104, 114, 115]. Достаточно трудно сделать выводы о распределении порового давления при оттаивании из-за разных условий проведения испытаний и большого разброса опытных данных.

Влияние минерального состава грунтов на развитие деформаций осадки исследовалось на кафедре геокриологии МГУ на образцах каолинитовой, монтмориллонитовой и полиминаральной глин. Максимальная величина деформаций, обусловленных сегрегационно-миграционным льдонакоплением, отмечена в каолинитовой глине, меньше в полиминеральной, а в монтмориллонитовой видимых прослоев не наблюдалось. Отсюда видно, что с увеличением в грунте минералов группы монтмориллонита приводит к снижению величины деформаций оттаивающего грунта за счет сегрегационно-миграционного льдонакопления [26].

После цикла замерзания и оттаивания происходит изменение гранулометрического состава [56,118]. Так после первого цикла было зафиксировано увеличение количества частиц меньше 1 мм в глинах с 13 до 52 % [118].

Из внешних факторов наибольшее влияние оказывает температура и скорость оттаивания [26,80,87,116,127]. Скорость оттаивания влияет на фильтрационные свойства, так как при быстром оттаивании происходит сохранение посткриогенной текстуры, а при медленном ее разрушение. Экспериментальными исследованиями установлено, что при скорости оттаивания, превышающей 1,5 см/ч, время миграции влаги в мерзлую зону мало для образования в ней сегрегационных прослоев льда. В этом случае деформация оттаивающих грунтов определяется суммой деформаций набухания и осадки. Уменьшение скорости оттаивания приводит к интенсивному сегрегационному льдовыделению, с одной стороны, и к обезвоживанию талого грунта с другой [26]. Максимальная осадка наблюдается при оттаивании под нагрузкой, когда образовавшаяся в момент оттаивания вода быстро отводится, не давая ему набухнуть [87].

Выявлено увеличение деформируемости дисперсных пород при повышении температурного режима оттаивания и последующей тепловой обработки до 60-80°C, и уменьшение при дальнейшем повышении до 200 °С. Это объясняется структурно-текстурными преобразованиями в оттаявшем грунте, обусловленным лучшим сохранением посткриогенной текстуры до температур 80 °С, а при дальнейшем повышении температуры происходят процессы термоагрегации и парообразованию, приводящие к уменьшению общей пористости и, в итоге, к меньшей сжимаемости оттаявших грунтов [80, 81].

Изменения в деформационных свойствах существенно зависят от дренажных условий оттока влаги в процессе оттаивания. Эти данные получены на глинистых грунтах путем проведения серии трехосных испытаний для различных условий дренажа при замораживании и оттаивания [91], и компрессионных испытаний [109].

Таким образом, можно сделать следующий вывод, что осадка грунтов при оттаивании в значительной степени зависит от влажности, плотности, вида грунта, криогенной текстуры, минерального состава, изменения коэффициента фильтрации, скорости оттаивания, условий оттока влаги, условий проведения

испытаний (компрессионные или трехосные), размера образца, условий промерзания.

1.2. Приборы и оборудование для исследования деформационных свойств оттаивающих грунтов

Н. А. Цытович [86] разработал специальный прибор (одомер) и методику определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов. В приборе выполняется условие одностороннего оттаивания. Оттаивание происходит только сверху через металлический штамп с положительной температурой.

В настоящее время исследователями используется практически тот же самый прибор с небольшими дополнениями: датчиками температуры, давления, другими материалами корпуса, но принципиальная схема остается такая же, какая была разработана Цытовичем [29, 54, 114, 115, 126, 133].

Рядом исследователей (Хейфиц В.З. и др., Калачев В.Я. и др.) [29] разработаны приборы, исключаящие трение по боковой поверхности образцов. С этой целью рабочее кольцо выполнялось из набора жестких в радиальном и податливых в осевом направлении колец, что обеспечивало отсутствие касательных напряжений на боковой поверхности.

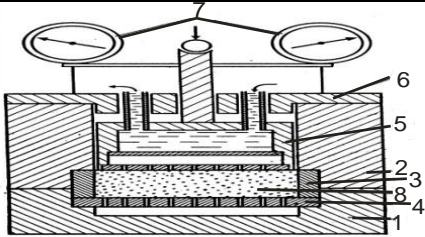
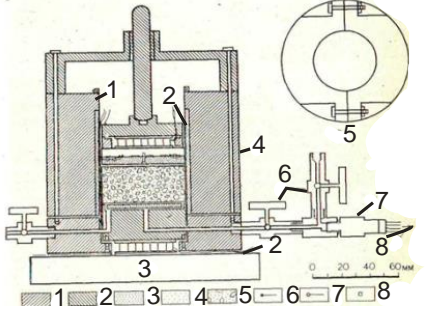
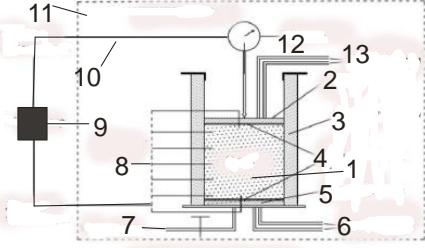
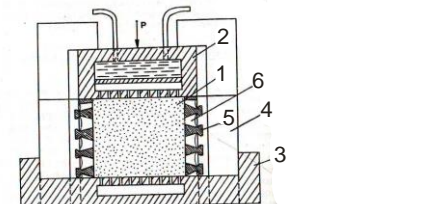
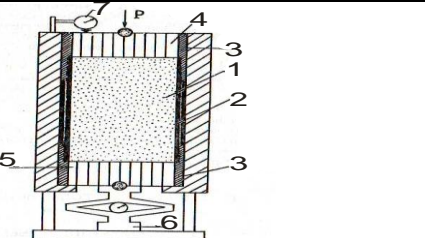
На кафедре геокриологии геологического факультета МГУ используется прибор КГ-1 для испытаний, учитывающий трение по боковой поверхности [29]. В основании прибора устанавливается динамометр. Разность между нагрузкой, передаваемой с помощью рычага, и нагрузкой, фиксируемой динамометром, определяет силу трения по боковой поверхности образца.

В последние годы во многих научных исследованиях стали применяться трехосные установки, которые позволяют проводить испытания, приближенные к природным условиям [105, 107, 38]. Но при этом установки, используемые для испытаний оттаивающих грунтов, в большинстве случаев обладают отличием от обычных трехосных установок. Так, верхний штамп подключен к термостату, который имеет положительную температуру, а сам образец находится при отрицательной, тем самым обеспечивается одностороннее оттаивание. Но трехосные испытания проводятся не очень часто.

Схемы рассмотренных модификаций одометров, обеспечивающих одностороннее оттаивание, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Конструкции приборов, обеспечивающие плоскопараллельное оттаивание, для экспериментальных исследований осадок.

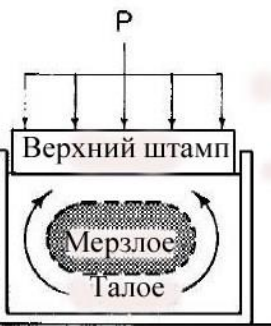
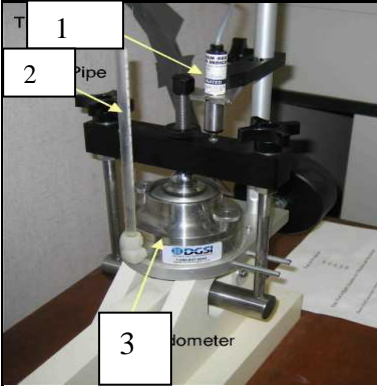
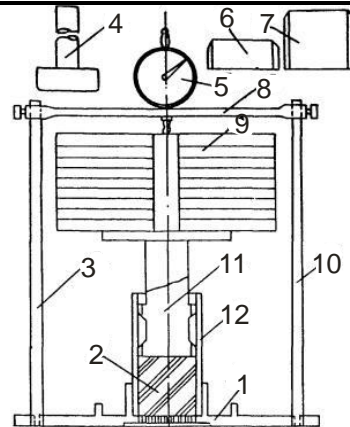
Схемы приборов	Условные обозначения	Название, ссылка
	1- основание; 2 – направляющий цилиндр; 3 – рабочее нетеплопроводное кольцо; 4 – перфорированный диск; 5 – штамп; 6 – крышка; 7 – индикаторы; 8 – грунт	Одометр (Цытович, 1941)
	Условные обозначения: 1— люцит; 2 — алюминий; 3— пористая пластинка (нержавеющая); 4 — тефлон; 5 — образец грунта; 6 — термистор; 7 — термопара; 8 — кольца. Цифры на рисунке: 1— резиновая мембрана; 2 — направление к источнику постоянного тока; 3 — охлаждаемая емкость; 4 — разъемное кольцо; 5 — деталь разъемного кольца (вне масштаба); 6 — краны; 7 — датчик; 8— показатель деформации	Пермоуд (Morgenstem, 1973)
	1- образец грунта, 2- верхний штамп, 3- корпус из плексиглаза, 4 – фильтровальная бумага, 5 – нижний штамп, 6 – датчики силы, 7- устройство для оттока воды, 8- датчики температуры, 9 – компьютер, 10 – датчики перемещения, 11 – холодильная камера, 12 – мессура, 13 – датчик силы	Одометр (Qi, 2008)
	1-образец грунта, 2 – штамп, 3 – жесткое днище, 4 – рабочий цилиндр, 5 – металлические кольца, 6 – резиновые кольца	Одометр с податливыми стенками (Ершов, 1995)
	1 – образец грунта, 2 – грунтонос, 3 – переходник, 4 коронка, 5. – нижний штамп, 6 – динамометр, 7 – индикатор	Прибор КГ-1 (Ершов, 1995)

Ряд авторов проводили свои исследования в обычных компрессионных

приборах в условиях всестороннего оттаивания. Модели таких приборов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Конструкции приборов, обеспечивающие всестороннее оттаивание, для экспериментальных исследований осадок.

Вид прибора	Условные обозначения	Название, ссылка
	—	Консолидомер, (Croy, 1973)
	1. Датчик деформации, 2. – трубка, 3. – одометр.	Консолидомер (Paudel, 2009)
	1 -пята-подставка, 2 -кern мерзлого грунта, 3 - левая стойка, 4 – толкатель, 5 – индикатор, 6,7 – пробоотборники, 8 – переключатель, 9 – груз, 10 – правая стойка, 11- штамп, 12 - цилиндр для керна	Прибор относительной просадочности (Аткачис,1977)

Ф. Croy [101] для исследования сжимаемости оттаивающих грунтов предлагает применять компрессионные приборы, как обеспечивающие одностороннее оттаивание, так и всестороннее.

М.Ф. Киселев [42] экспериментально установил, что конечные осадки оттаивающих образцов глин практически не зависят от скорости оттаивания, что позволяет не удерживать постоянство температуры штампа в период оттаивания и

допускать всестороннее оттаивание при определении осадок оттаивающих грунтов. При этом сравнивается только осадка после оттаивания, но неизвестно как будет уплотняться грунт после оттаивания и как это повлияет на деформационные характеристики. Кроме этого, им не проведено сравнение разных видов грунтов, а проведены опыты только для глин.

Paudel [119] в приборе со всесторонним тепловым потоком изучал влияние цикла промерзания и оттаивания на коэффициент консолидации и фильтрации.

Лабораторией инженерной геологии и геофизики отделения изысканий и проектирования железных дорог ЦНИИСа разработан экспресс метод оценки осадки оттаивающих грунтов [53], для которого используется прибор относительной просадочности, конструкция Ленгипротранса (ПОП). Но при этом нет никаких данных о сравнении показателей, получаемых при использовании этого прибора, и деформационных характеристик, а также реально наблюдаемых осадок. Поэтому этот метод не нашел широкого применения в практике.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее распространенным методом исследования оттаивающих грунтов являются компрессионные испытания.
2. Практически не разработаны экспресс методики, позволяющие получать достоверные данные деформационных характеристик при малых затратах времени.
3. В настоящее время нет данных о сравнении деформационных показателей, полученных в приборах, обеспечивающих одностороннее и всестороннее оттаивание.

1.3. Деформирование оттаивающих грунтов.

Деформирование оттаивающих грунтов обусловлено развитием ряда теплофизических, механических, физико-химических процессов [26,45,56]. Деформацию мерзлых грунтов при оттаивании (S) в общем виде можно представить следующим образом [26]:

$$S = S_{л} + S_{см} + S_{д} + S_{ус} - S_{наб} - S_{г} \quad (1.1)$$

$S_{л}$ – деформация грунта за счет объемных фазовых изменений при переходе

льда в воду; $S_{см}$ - деформация грунта, обусловленная преобразованием структуры и текстуры (смыкание макропор) при консолидации оттаивающего грунта за счет действия собственного веса; $S_{д}$ - деформация грунта, обусловленная преобразованием структуры и текстуры (смыкание макропор) при консолидации оттаивающего грунта за счет внешней бытовой нагрузки; $S_{ус}$ - деформация грунта за счет усадки; $S_{наб}$ - деформация грунта за счет набухания; S_{J} - деформация грунта за счет сегрегационного льдовыделения в мерзлой зоне.

Следует отметить, что разделение процесса деформирования на отдельные фазы является условным, поскольку в любой момент времени все указанные процессы действуют одновременно.

Соотношение (1.1) является итогом работы большого числа исследователей. Исследования процессов промерзания-оттаивания, выполненные на кафедре геокриологии МГУ под руководством Э.Д. Ершова, позволили дополнить это соотношение, составляющими связанными с усадкой и миграцией влаги.

Соотношения выделенных процессов в общей деформации мерзлых грунтов при оттаивании неравнозначны и зависят от литологии, текстуры, давлений, действующих при оттаивании, скорости оттаивания и температурных градиентов в подстилающей мерзлой зоне, времени консолидации оттаявшего грунта. Рассмотрим отдельно каждый из выделенных процессов.

Деформация грунта за счет объемных фазовых изменений обусловлена фазовым переходом льда в воду, при котором происходит уменьшение объема на 9,1%. Для оттаивающих песчаных и тонкодисперсных грунтов массивной текстуры эти деформации являются определяющими. При оценке осадок оттаивающих грунтов по влажностным характеристикам объемные фазовые превращения учитывали введением коэффициента 0,9 [11,66]. При неполном водонасыщении коэффициент уменьшается и зависит от объема газовой составляющей.

Деформации, обусловленные преобразованием структуры и текстуры за счет действия собственного веса и внешней нагрузки, включает осадки за счет вытаивания ледяных шпиров с образованием макропор и изменением

пространственного взаиморасположения текстурных элементов и зависят от величины давления, литологического состава, криогенной текстуры, льдистости.

Деформация грунта в результате усадки при оттаивании заключается в обезвоживании талой зоны, вследствие миграции влаги в мерзлую зону, в результате происходит сближение частиц, уменьшение пористости, укрупнение микроагрегатов, их переориентировка [26].

Деформация грунта за счет процесса набухания связана с набуханием плотных минеральных прослоев при переносе в них влаги из оттаявших ледяных шлиров. При набухании происходит расклинивающее действие водных пленок, что вызывает рост гидратных оболочек вокруг глинистых частиц, увеличение пористости и уменьшение сжимающих эффективных напряжений в скелете грунта.

Деформация грунта за счет сегрегационного льдовыделения в оттаивающих породах обусловлена миграцией влаги из оттаявшей зоны в мерзлую при наличии градиента температуры в последней. В результате образуется избыточное количество влаги, несоответствующее равновесному значению при данной температуре, замерзание ее в итоге приводит к образованию сегрегационного льда. Итогом этого процесса является возникновение положительных деформаций, уменьшающих деформацию осадки. [25].

Зарецкий Ю.К. [33] на основе представлений о механизме деформирования грунтов определяет общую осадку оттаивающего грунта, как сумму трех составляющих:

$$S_t = S_{1t} + S_{2t} + S_{3t}, \quad (1.2)$$

где S_{1t} – тепловая осадка, обусловленная изменением объема грунта при переходе льда в воду; S_{2t} – осадка, происходящая в период постепенного оттаивания основания под нагрузкой; S_{3t} – осадка, характеризующая деформацию уже оттаявшего слоя постоянной величины, соответствующей окончанию процесса оттаивания.

Для определения каждого параметра были получены уравнения на основе теории фильтрационной консолидации с использованием экспериментально

определяемых характеристик.

На основе изученной литературы можно сделать вывод, что деформация грунта за счет усадки, набухания и сегрегационного льдовыделения в мерзлой зоне в формулах и расчетах никак не учитывается. Суммарная осадка при оттаивании складывается из двух составляющих: 1) осадка за счет уменьшения объема льда при таянии (некоторые исследователи используют только этот вид осадки [2]); 2) осадка под действием собственного веса и приложенной нагрузки.

В настоящий момент определились два основных подхода к расчету осадок мерзлых грунтов при оттаивании:

- расчетный (по физическим характеристикам). На основе этого подхода получено около 15 зависимостей осадки оттаивающих дисперсных грунтов от физических свойств.
- экспериментальный (определение коэффициентов оттаивания и сжимаемости в полевых и лабораторных условиях) для определения предельных осадок при оттаивании. На основе этого подхода разработаны и утверждены нормативными документами методики определения деформационных характеристик в лабораторных и полевых условиях.

1.4. Уравнения для расчета осадки оттаивающих грунтов

На основе экспериментальных данных и теоретических предпосылок, многие исследователи предложили различные расчётные формулы для определения осадок фундаментов на оттаивающих грунтах. Основные формулы приведены в работе Л.Т. Роман [67] (таблица 1.3). Все расчётные формулы для определения осадки оттаивающих грунтов являются приближёнными, так как получены при определенных допущениях.

Формула А.Е. Федосова [78] построена в основном на принципе изменения влажности грунта и уменьшение объема льда при переходе его в воду. Изменение объема пор мерзлого грунта, не заполненного водой и льдом, совсем не учитывается, поэтому формула справедлива для случаев полного заполнения пор грунта льдом и водой.

Расчетные формулы для определения осадки (S) оттаивающих грунтов

Формулы	Авторы
$S = k_1 \frac{\rho_s W}{\rho_s W + 1} \cdot h \quad (1.3.)$	Федосов А.Е.
$S = 1,09 \frac{(W - W_p) \rho}{(1 - W) \rho_w} \cdot h \quad (1.4)$	Гольдштейн М.Н.
$S = \frac{\rho_s (W_c - W_m) * h}{1 + \rho_s W_c} \quad (1.5.)$	Пчелинцев А.М.
$S = \frac{(1 + 0,09i)W - W_m}{(1 + 0,09i)W - W_m + \frac{\rho_w}{\rho_{df}}} \quad (1.6.)$	Бакулин Ф.Г., Жуков В.Ф.
$S = \left\{ 1 - \rho_{df} \left[\frac{1}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_w} (W_p + k_3 I_p) \right] \right\} \cdot h \quad (1.7.)$ (глинистый грунт)	Киселев М.Ф.
$S = (m e_f k_4 + b) \cdot h \quad (1.8.)$	Ушкалов В.П.
$S = \frac{\rho_s (W - \rho_i W_p) h}{\rho_i + W \rho_s} + 0,5 h_i \quad (1.9.)$	Давыдочкин А.Н.
$S = \frac{k_5 W}{2,7W + 0,9} \quad (1.10.)$	Вотяков И.Н.
$S = \frac{W_f (1 + 0,09i) - W_{th}}{(1,09W_f - 0,09W_{af}) / e_f + W_f (1 + 0,09i)} \cdot h \quad (1.11.)$	Crory F.
Для илов $S = [0,736 - 1,018 \ln \rho_f \pm 0,07] \cdot h \quad (1.12.)$	Speer T.L., Watson G.H.
$S = \left[0,80 - 0,868 \left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} - 1,15 \right)^{1/2} \pm 0,05 \right] \cdot h \quad (1.13)$	Watson G. H., R. K. Rowley, W. A. Slusarchuk

Продолжение таблицы 1.3	
<p>Песок</p> $S = \left[0,80 - 0,685 \left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} - 0,241 \right)^{1/2} \pm 0,05 \right] \cdot h \quad (1.14.)$	Keil L.D., Nilsen N.M., Gupta R.C.
<p>Глина</p> $S = \left[0,90 - 0,691 \left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} - 0,236 \right)^{1/2} \pm 0,05 \right] \cdot h \quad (1.15.)$	

Примечание. Условные обозначения в формулах (1.3) – (1.15): ρ – плотность мерзлого грунта, г/см³; ρ_i – плотность льда г/см³; ρ_s – плотность частиц грунта г/см³; ρ_{df} – плотность скелета мерзлого грунта г/см³; ρ_{dth} – плотность скелета грунта после оттаивания под давлением 0,2-0,5 МПа; W_{tot} – весовая влажность, доли ед.; W_f – влажность мерзлого грунта, доли ед.; W_p – влажность на пределе пластичности, доли ед.; W_w – влажность за счет незамерзшей воды, доли ед.; W_{th} – влажность оттаявшего грунта, доли ед.; W_m – влажность минеральных частиц, доли ед.; m, b – параметры (таблица 1.4); I_p – число пластичности; i – льдистость; h – мощность оттаянного слоя, см; h_i – мощность ледяных включений, см; e_f – коэффициент пористости мерзлого грунта; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты (для песка $k_1 = 0,1$, для суглинка $k_1 = 0,05$; $k_2 = 0,8$); k_3 – коэффициент пропорциональности (таблица 1.5); k_4 – поправочный эмпирический коэффициент, учитывающий отклонения отдельных значений осадок от средних значений, равный 0,95 для суглинков и 1,3 для песчаных грунтов; k_5 – эмпирический коэффициент, зависящий от вида грунта, влажности и уплотняющего давления (рисунок 1.1).

Таблица 1.4.

Значения параметров m и b

Вид грунта	Значения коэффициентов m и b при давлении, МПа			
	0,1		0,3	
	m	b	m	b
Суглинок	0,0878	0,0205	0,1109	0,0632
Супесь	0,0779	0,0224	0,1050	0,0612
Песок	0,0880	0,0013	0,1129	0,0296
Гравийный грунт	0,0878	0,0089	0,1123	0,0122

Значения K_3 в зависимости от вида грунта и уплотняющего давления

Грунт	Число пластичности	K_d для различных уплотняющих давлений, МПа (кгс/см ²)							
		0,05 (0,5)	0,075 (0,75)	0,1 (1)	0,2 (2)	0,3 (3)	0,4 (4)	0,5 (5)	0,6 (6)
Супесь	$I_p \leq 0,03$	2,5	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7
	$0,03 < I_p \leq 0,05$	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7	0,55
	$0,05 \leq I_p \leq 0,07$	1,7	1,4	1,2	1,0	0,8	0,75	0,65	0,5
Суглинок	$0,07 < I_p \leq 0,09$	1,5	1,3	1,1	0,9	0,75	0,7	0,6	0,45
	$0,09 < I_p \leq 0,13$	1,3	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
	$0,13 < I_p \leq 0,17$	1,2	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35
Глина	$0,17 < I_p \leq 0,21$	1,1	1,0	0,8	0,6	0,5	0,45	0,35	0,3
	$0,21 < I_p \leq 0,26$	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25
	$0,26 < I_p \leq 0,32$	0,9	0,8	0,6	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
	$I_p < 0,32$	0,8	0,7	0,5	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15

Формула М.Н. Гольдштейна [13], учитывает отжатие воды до влажности, соответствующей нижнему пределу пластичности грунта. При этом экспериментальные исследования показали, что для уплотнения оттаивающего грунта до влажности нижнего предела в некоторых случаях требуется напряжение до 0,5МПа в зависимости от вида грунта. Кроме этого, грунты, содержащие прослойки и линзы льда, не уплотняются полностью, в них всегда остаются пустоты [30].

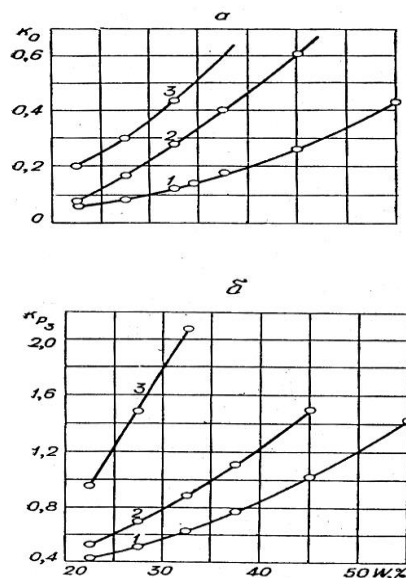


Рисунок 1.1. Зависимость коэффициента k_s от влажности W_{tot} от влажности мерзлых грунтов при оттаивании: а – без нагрузки; б – при нагрузке 0.3 МПа; 1 – супесь и суглинок; 2 – глина; 3 – разрушенный мергель

А.М. Пчелинцев [65] предложил определять осадки оттаивающих грунтов за счет разрушения базального льда-цемента и разрушения слоистой криогенной текстуры на основании разности между суммарной влажностью вечномерзлого грунта и влажностью минеральной части массивной криогенной текстуры. Эта формула применима только к таким грунтам, все поры которых нацело заполнены льдом, и без учета уплотняемости грунта под давлением.

Формула Ф.Г. Бакулина и В.Ф. Жукова [4,5,6] учитывает сложение грунтов и позволяет определить максимально возможную осадку при оттаивании грунта под нагрузкой порядка 0,6-0,8 МПа. Жуков предложил изменение коэффициента пористости мерзлого и оттаявшего уплотненного грунта заменить изменением объема компонентов, содержащихся в порах мерзлого грунта: льда, воды и воздуха. При этом некоторые из физических характеристик, например влажность минеральных частиц и льдистость, довольно трудноопределимы, поэтому формула не столь часто используется [30,31].

В формуле Киселева [42], предназначенной для оценки осадки оттаивания глинистых грунтов, плотность скелета грунта, оттаявшего под нагрузкой, принимается в зависимости от вида грунта и давления в пределах от 0,1 – 0,6 МПа, влияние которых учитывается эмпирическим коэффициентом пропорциональности K_3 . Однако следует отметить, что выражение для определения коэффициента K_3 получено по опытным данным испытаний искусственно увлажненных и замороженных грунтов, что может привести к погрешностям при расчете осадок оттаивающих грунтов различного генезиса.

В.П. Ушкалов [75,76] в своей расчётной формуле вводит несколько выведенных им самостоятельно коэффициентов, учитывающих возможность бокового расширения грунта и изменение свойств под нагрузкой, а распределение давлений в грунте принимается по экспериментально установленной автором схеме.

А.Н. Давыдочкин [23] при расчете осадки учитывает наличие ледяных прослоев в мёрзлом грунте. Однако их толщину можно определить приближенно и только при условии горизонтального расположения шпиров. Весьма условным

является поправочный коэффициент 0,5, учитывающий разрыхление грунта после оттаивания.

И.Н. Вотяковым [11] была предложена расчётно-эмпирическая формула, полученная при исследовании многолетнемёрзлых грунтов Якутии. Автор установил, что величина относительной осадки оттаивающих мелкодисперсных грунтов Якутии в зависимости от их влажности варьируется в пределах от 3 до 9% по отношению к приведенной высоте льда в грунте. Входящий в формулу эмпирический коэффициент K_5 зависит от вида грунта, его влажности и величины нагрузки (рисунок 1.1). Эта формула справедлива для грунтов массивной криогенной текстуры региона Центральной Якутии.

Формула F. Croy [101] рекомендуется для определения осадок при оттаивании глинистых грунтов по основным физическим характеристикам в мерзлом и оттаявшем состоянии. Но эта зависимость пригодна для случая нулевой горизонтальной деформации.

Формула (1.12) [124] была получена при проведении крупномасштабных исследований, которое проводились в связи с проектом строительства трубопровода в долине р. Маккензи. На основании большого количества опытов была установлена корреляция между относительной осадкой при оттаивании (под давлением, равным давлению перекрывающих пород) и объемной массой мерзлого грунта. С использованием метода меньших квадратов получена зависимость для средней осадки при оттаивании.

В последующем исследовании осадок при оттаивании глин из того же района [130] подвели итог всем имеющимся данным и получили довольно узкий диапазон корреляции – формула (1.13). Эта формула является обоснованной, если отношение $\left[\left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} \right) \right]$ находится в интервале 1,2 -2 д.е. и применима только для тех типов грунтов, с которыми проводились исследования.

Аналогичное изучение глин с низкой пластичностью из северной части Манитобы [92] привело к установлению зависимости осадки при оттаивании от объемной массы мерзлого грунта, подобной приведенной в уравнении (1.13), но

с относительными осадками при оттаивании примерно на 10 % выше, поэтому они были преобразованы и получены формулы 1.14-1.15.

Анализ полученных формул наглядно показывает, какие из физических свойств мерзлых грунтов наиболее существенно определяют собой осадки при оттаивании. Как можно видеть, такие свойства характеризуются, прежде всего, показателями плотности (плотность мерзлого грунта, скелета грунта, частиц грунта), показателями влажности (суммарная влажность мерзлого грунта, льдистость, влажность за счет незамерзшей воды). Влияние дисперсности учитывается введением в некоторые формулы показателя влажности на пределе пластичности, числа пластичности.

Таким образом, можно сделать вывод, что практически невозможно получение обобщенной корреляционной зависимости осадок при оттаивании от характеристик физических свойств, так как осадки при оттаивании обусловлены многими факторами, неподдающимися количественному определению. К таким факторам относятся структура, текстура грунта, набухание частиц грунта, физико-химические процессы, широкий диапазон дисперсности в пределах каждого вида грунта, скорость оттаивания и т.д.

1.5. Расчет осадок оттаявших грунтов на основе опытных значений деформационных характеристик

Осадка оттаявшего и уплотненного грунта включает две составляющих:

$$S = S_{th} + S_{\sigma,k}, \quad (1.16)$$

где S_{th} –осадка, обусловленная действием оттаивания и уплотнения от собственного веса; $S_{\sigma,k}$ –осадка, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса сооружения.

Составляющая осадки S_{th} определяется:

$$S_{th} = \sum_1^n (A_i + m_i \sigma_{z,g,i}) h_i, \quad (1.17)$$

где A_i и m_i - соответственно коэффициенты оттаивания (доли единицы) и сжимаемости (МПа^{-1}), полученные экспериментально; $\sigma_{z,g,i}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя, определяемое

расчетом для глубины Z_i от уровня планировочных отметок с учетом взвешивающего действия воды; h_i – толщина i -го слоя оттаивающего грунта, см.

Коэффициенты оттаивания (A) и сжимаемости (m) оттаивающего грунта надлежит устанавливать, как правило, по результатам полевых испытаний мерзлых грунтов горячим штампом по методике ГОСТ 20276-99. Если значения деформационных характеристик получены по данным лабораторных испытаний грунтов, то их расчетные значения при определении осадок оттаивающего основания следует умножать на поправочный коэффициент $k_i = 1 + \Delta_i$, где Δ_i – разность между суммарной льдистостью i -го слоя грунта и льдистостью испытанного образца, взятого из этого слоя. Допускается вводить поправки за неполное смыкание макропор и набухание оттаивающего грунта, если это подтверждено экспериментальными данными.

Составляющая осадки $S_{\sigma, k}$ при расчетной схеме основания в виде линейно-деформируемого слоя конечной толщины, разработанной в механике грунтов [88] и принятой в нормативных документах [72], определяется по формуле:

$$S_{\sigma, k} = \sigma_0 b K_h \sum_i^n a_i K_{\mu, i} (K_i - K_{i-1}), \quad (1.18)$$

где σ_0 – дополнительное вертикальное давление на основание под подошвой фундамента, Мпа; b – ширина подошвы фундамента, см; K_h – безразмерный коэффициент, определяемый по таблице 1.6 в зависимости от отношения Z/b , где Z – расстояние от подошвы фундамента до нижней границы зоны оттаивания или кровли непросадочного при оттаивании грунта, см; a_i – коэффициент сжимаемости i -го слоя грунта, МПа⁻¹; $K_{\mu, i}$ – коэффициент, определяемый по табл. 1.3 в зависимости от отношения Z/b , где Z – расстояние от подошвы фундамента до середины i -го слоя грунта, см; K_i и K_{i-1} – коэффициенты, определяемые по таблице 1.7 в зависимости от отношения $l/b, Z_i/b, Z_{i-1}/b$, где Z_i и Z_{i-1} – расстояние от подошвы фундамента соответственно до подошвы и кровли i -го слоя грунта; l – длина подошвы фундамента, см.

Способ определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов и расчета конечных стабилизированных значений осадки оттаивающих грунтов

оснований сооружений использовался многими авторами и хорошо соотноситься с наблюдаемыми осадками [88].

Развитие осадок оттаивающих грунтов во времени необходимо определять с учетом скорости оттаивания, а также с учетом фильтрационной консолидации.

Таблица 1.6

Значения коэффициентов K_h и $K_{\mu,i}$

Z/b	K_h	Коэффициент $K_{\mu,i}$ для грунтов			
		Крупнообл	Песка и супеси	суглинка	Глины
0-0,25	1,35	1,35	1,35	1,36	1,55
0,25-0,5	1,25	1,33	1,35	1,42	1,79
0,5-1,5	1,15	1,31	1,35	1,45	1,96
1,5-3,5	1,10	1,29	1,35	1,52	2,15
3,5-5	1,05	1,29	1,35	1,53	2,22
5,0	1,00	1,28	1,35	1,54	2,28

Таблица 1.7.

Значения коэффициента K

Z/b	Коэффициент K при l/b						
	1	1,4	1,8	2,4	3,2	5	10
0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,104
0,4	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,208
0,6	0,299	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,311
0,8	0,380	0,394	0,397	0,397	0,397	0,397	0,412
1,0	0,446	0,472	0,482	0,486	0,486	0,486	0,511
1,2	0,499	0,538	0,556	0,565	0,567	0,567	0,605
1,4	0,542	0,592	0,618	0,635	0,640	0,640	0,687
1,6	0,577	0,637	0,671	0,696	0,707	0,709	0,763
1,8	0,606	0,676	0,717	0,750	0,768	0,772	0,831
2,0	0,630	0,708	0,756	0,796	0,820	0,830	0,892
2,5	0,676	0,769	0,832	0,889	0,928	0,952	1,020

Продолжение таблицы 1.7							
3,0	0,708	0,814	0,887	0,958	1,011	1,056	1,138
3,5	0,732	0,846	0,927	1,016	1,123	1,131	1,230
4,0	0,751	0,872	0,960	1,051	1,128	1,205	1,316
6,0	0,794	0,933	1,037	1,151	1,257	1,384	1,550
10,0	0,830	0,983	1,100	1,236	1,365	1,547	1,696
16,0	0,850	1,011	1,137	1,284	1,430	1,645	2,095
20,0	0,857	1,021	1,149	1,300	1,451	1,679	2,236

На основе результатов экспериментальных исследований консолидации оттаивающих грунтов Зарецким Ю.К. [33] получено аналитическое решение дифференциального уравнения фильтрационной консолидации применительно к оттаивающим грунтам в случае одномерной задачи. Отличие задачи консолидации оттаивающего основания от обычной компрессионной задачи заключается, прежде всего, в том, что процесс консолидации грунта при оттаивании происходит в слое переменной во времени толщины, а также в формулировке граничных условий.

В его работах дается решение конкретных задач, доведенных до численных результатов, для случаев: когда поровая вода полностью ($m=0$) или частично воспринимает на границе оттаивания передаваемое на грунт давление ($m \neq 0$).

Согласно полученному решению значение осадки оттаивающего грунта для заданного момента времени определяется формулами

При $m=0$

$$S = A_0 h_t + a_0 \left[\chi_1 P_0 h_t + \frac{\chi_2 \gamma_{\text{взв}} h_t^2}{2} \right] + a_0 \left[(1 - \chi_1) P_0 h_{om} + \frac{(1 - \chi_1) \gamma_{\text{взв}} h_{om}^2}{2} \right]$$

$m \neq 0$

$$S = A_0 h_t + a_0 \left[\chi_1 P_0 h_t + \frac{n \gamma_{\text{взв}} h_t^2}{2} \right] + a_0 \left[(1 - \chi) P_0 h_{om} + \frac{(1 - n) \gamma_{\text{взв}} h_{om}^2}{2} \right]$$

где A_0 – коэффициент оттаивания, д.е., a_0 – коэффициент сжимаемости, МПа^{-1} , P_0 – внешнее давление, передаваемое на грунт, МПа , h_t – глубина оттаивания, м , $\gamma_{\text{взв}}$ – плотность грунта при оттаивании, г/см^3 , χ_1, χ_2, χ, n – некоторые функции, значения которых табулированы. В этом решении считается, что

сжимаемость и водопроницаемость в течение всего процесса постоянны.

Г.М. Фельдманом [79] предложено аналитическое решение одномерной задачи фильтрационной консолидации с учетом переменной проницаемости и сжимаемости оттаивающего грунта при изменении его пористости и напряженного состояния. Предложенная им формула для определения осадки оттаивающего грунта имеет следующий вид:

$$S = \frac{Dh_t}{(1-e_H)(e^{-nP_0} - 1 + nm\gamma_{\text{отт}} h_t)4} \{-(1-nm\gamma_{\text{отт}} h_t)^2 [1 - 2 \ln(1 - nm\gamma_{\text{отт}} h_t)] + e^{-2nP_0} [2nP_0 + 1]\}$$

P_0 – внешнее давление, передаваемое на грунт, МПа, h_t – глубина оттаивания, м, $\gamma_{\text{отт}}$ – плотность грунта при оттаивании, г/см³, m, n – некоторые функции определяемые табулированием, e_H – начальный коэффициент пористости, д.е., D – коэффициент рассчитываемый аналитически

В то же время М.В. Малышевым [51] разработано аналитическое решение пространственной задачи консолидации оттаивающего слоя грунта. При этом эпюра распределения уплотняющих давлений принималась из известного в механике грунтов пространственного решения о распределении напряжений под центром фундамента. Как и во всех предыдущих решениях принималось, что отфильтровывание воды происходит в вертикальном направлении. Предложенное им выражение для расчета осадки имеет вид:

$$S = A_0 h_t + a_0 [\gamma_{\text{отт}} h_t^2 \psi_1 + P_0 h_t \psi] + a_0 \{ \gamma_{\text{отт}} h_{\text{отт}}^2 [(\frac{1}{2} - \psi_1) T_1 - T_2] + P_0 h_{\text{отт}} [(\Theta_1 - \psi) - \Theta_1 T_2] \}$$

где A_0 – коэффициент оттаивания, д.е., a_0 – коэффициент сжимаемости, МПа⁻¹, P_0 – внешнее давление, передаваемое на грунт, МПа, h_t – глубина оттаивания, м, $\gamma_{\text{отт}}$ – плотность грунта при оттаивании, г/см³, $\psi, \psi_1, T_1, T_2, \Theta_1, \Theta_2$ – сложные функции, для определения которых используются аналитические выражения и графики.

Использование имеющихся аналитических методов расчета консолидации оттаивающего грунта для решения практических задач затруднено заданием сложных граничных условий и приводит к необходимости упрощающих допущений, искажающих действительную картину процесса.

В последнее время получили широкое применение математические

программы, основанные на методе конечных элементов, с помощью которых производят расчеты осадок при оттаивании, но при этом в этих программах также используются деформационные характеристики [1, 9, 14, 37, 49, 132].

Таким образом, из всего вышеизложенного можно сделать следующий вывод. В настоящее время, в основном, расчет осадок мерзлых грунтов при оттаивании в основании сооружений выполняется с использованием деформационных характеристик, полученных экспериментальным путем. Поэтому необходимо уделить большое внимание методикам их определения, с целью повышения достоверности данных расчета, а также разработки новых подходов которые позволили получать достоверные данные при малых затратах средств и времени.

Выводы

По результатам литературного обзора можно сделать следующие выводы.

1. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов определяются компрессионными испытаниями. Разработаны и утверждены нормативными документами методики определения коэффициента оттаивания и сжимаемости и метод определения предельных осадок оттаивающих оснований сооружений.

2. Отсутствуют данные о влиянии условий оттаивания (одностороннего и всестороннего) на деформационные характеристики оттаивающих грунтов.

3. Осадка оттаивающих грунтов зависит от влажности, плотности, вида грунта, криогенной текстуры, минерального состава, изменения коэффициента фильтрации, скорости оттаивания, условий оттока влаги, типа испытаний, размера образца, условий промерзания.

4. Трудоемкость и длительность опытных определений деформационных характеристик оттаивающих грунтов обуславливает необходимость разработки экспресс методик, позволяющих получать достоверные значения осадок.

5. Практический интерес представляет обобщение данных исследований деформационных характеристик с учетом региональных условий их залегания с целью накопления базы данных, необходимых для оценки формирования напряженно-деформированного состояния грунтов при освоении криолитозоны.

6. Анализ методических подходов показывает возможность использования программ для математического моделирования процесса деформирования и исследования влияния ряда факторов на деформации оттаивающих грунтов.

На основе выполненного анализа современного состояния изученности были сформулированы цели и задачи данной диссертационной работы, приведенные во введении.

Глава 2. Состав и свойства исследуемых грунтов

Экспериментальные исследования проводились на грунтах, отобранных в различных регионах России как со сплошным, так и прерывистым распространением многолетнемерзлых грунтов (рисунок 2.1).

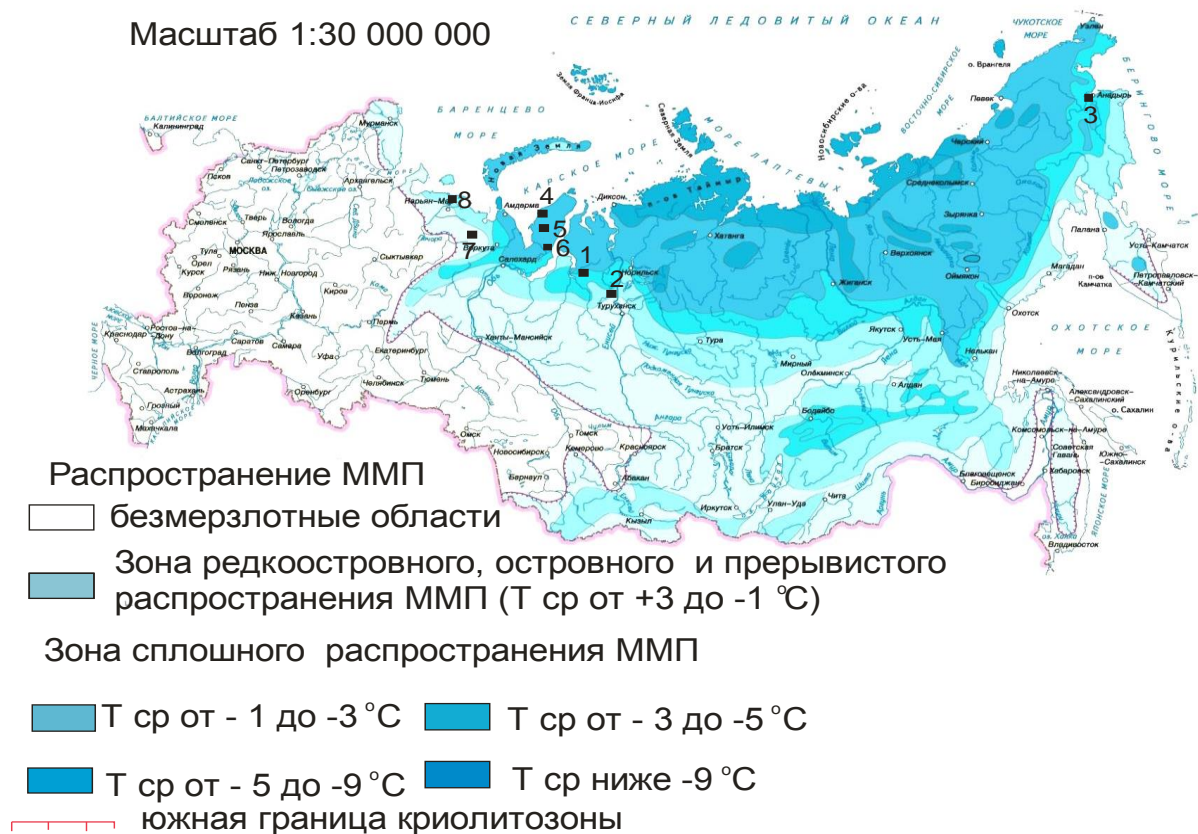


Рисунок 2.1 Районы отбора проб

Характеристика грунтов исследуемых регионов.

1. Таз-Енисейская область. Грунты представлены прибрежно-морскими отложениями (пески пылеватые) ($pm Q_{III} kz$) и морскими, ледниково-морскими (супесь, суглинок) ($m, gm Q_{II}$). Глинистые породы имеют тонко-среднешлировую криогенную слоистую и сетчатую текстуру и некоторые характеризуются повышенной льдистостью. Пески имеют массивную криогенную текстуру.

2. Ванкорская возвышенность. Генетические типы грунтов - прибрежно-морские отложения (пески мелкие) ($pm Q_{III} kz$), озерно-аллювиальные отложения (супеси) ($la Q_{III} kz$) и аллювиальные отложения (суглинки) ($a Q_{III} kr$). Глинистые грунты имеют тонкошлировую криогенную слоистую, сетчатую и массивную

текстуру. Пески имеют массивную криогенную текстуру [85].

3. Район г. Анадырь. Грунты представлены верхнеплейстоценовыми морскими и ледниково-морскими отложениями ($m, gm Q_{III}$), которые имеют очень широкое распространение и слагают нижние части разреза отложений на большей части рассматриваемой территории. Это в основном голубовато-серые суглинки с включениями мелкой гальки и гравия (10-30 %), с прослоями супеси. Преобладают массивные, и редкосетчатые текстуры.

4. Район западной, прибрежной, части Центрального Ямала в районе Харасавэйского месторождения. Грунты относятся к морским верхнеплейстоценовым отложениям ($m Q_{III}$), которые слагают в основном водораздельные поверхности. Они характеризуются сложным и фациально невыдержанным переслаиванием глинистых грунтов с преобладанием тонкодисперсных разностей с достаточно высокой льдистостью и сетчатой тонкошлировой криогенной текстурой.

5. Район западной, прибрежной, части Центрального Ямала в районе южной части Бованенковского месторождения. Грунты представлены верхнеплейстоценовыми морскими отложениями ($m Q_{III}$). В составе отложений в основном преобладает серый суглинок со слоистой и сетчатой криогенной текстурой, с подчиненным значением супеси.

6. Район юго-восточного побережья полуострова Ямал. Грунты относятся к морским верхнеплейстоценовым отложениям казанцевской свиты ($m Q_{III}$). Грунты представлены слоистыми толщами, сложенными серыми пылеватыми песками и темно-серыми супесями и суглинками, с преобладанием суглинков со слоистой и сетчатой криогенной текстурой.

7. Район Ненецкого автономного округа Архангельской области (220 км к северо-востоку от г.Усинска). Отложения средне - верхнеплейстоценовые ледово-морские ($gm Q_{II-III}$). Разрез большей части территории сложен суглинком, а пески и супеси имеют подчинённое значение. Для них характерны массивные и тонкошлировые слоистые криогенные текстуры. В верхних горизонтах характеризуются достаточно высокими значениями

влажности, а с глубиной влажность уменьшается.

8. Район Ненецкого автономного округа Архангельской области (350 км к северо-западу от г.Усинска). Среднеплейстоценовые ледово-морские отложения роговской свиты (gm Q_{II}) представлены в основном тяжелыми суглинками с прослоями супеси. Для них характерны тонкошлировые сетчатые криогенные текстуры.

Выполненный объем исследований деформаций оттаивающих грунтов ненарушенного строения (количество опытов: пески - 63, супеси - 106, суглинки - 245, глина - 17) позволяет обобщить результаты, необходимые для разработки методов прогноза и экспресс методик расчета осадок. Характеристика свойств грунтов приведена в приложении 1.

Отложения всех рассматриваемых районов имеют плейстоценовый возраст. 54 % исследованных грунтов относится к морским отложениям, 22 % – ледово-морским, 16 % - морским, ледниково-морским, остальные 8% - аллювиальным, озерно-аллювиальным. Все отложения представлены различными видами грунтов – глинами, суглинками, супесями, песками пылеватым и мелким с преобладанием суглинка (58% исследованных грунтов). Влажность грунтов меняется в широких пределах от 0,15 до 0,35 д.е. для песка, 0,15 до 0,96 д.е. - супеси, 0,18 до 1,46 д.е. - суглинка. Грунты характеризуются большим разнообразием строения и криогенных текстур.

Диапазон изменения показателей свойств (плотности грунта (ρ), суммарной влажности (W), влажности верхнего (W_L) и нижнего предела пластичности (W_p)) и экспериментальных значений деформационных характеристик (коэффициентов оттаивания (A) и сжимаемости (m)) представлены в таблице 2.1. Также указана средняя температура (t сред.) в районах, при этой же температуре проводились испытания на первой ступени в мерзлом состоянии.

Диапазон значений показателей плотности, влажности, пластичности и деформационных характеристик исследуемых грунтов

Регион № t сред. (°C)	Вид грунта	Глубина отбора, м	Количе- ство опытов	W_c , д.е	ρ , г/см ³	W_L , д.е.	W_p , д.е	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
1 (-2°C)	Песок пылев.	1-3	16	$\frac{0,17-0,26}{0,21}$	$\frac{1,88-2,05}{1,97}$	-	-	$\frac{0,05-0,11}{0,08}$	$\frac{0,02-0,05}{0,03}$
	Суглинок	1-3	53	$\frac{0,28-0,63}{0,39}$	$\frac{1,52-1,96}{1,74}$	$\frac{0,21-0,35}{0,28}$	$\frac{0,12-0,22}{0,18}$	$\frac{0,05-0,32}{0,16}$	$\frac{0,06-0,29}{0,16}$
	Супесь	1-3	27	$\frac{0,18-0,53}{0,27}$	$\frac{1,56-1,97}{1,88}$	$\frac{0,15-0,29}{0,22}$	$\frac{0,10-0,24}{0,17}$	$\frac{0,05-0,28}{0,14}$	$\frac{0,03-0,19}{0,10}$
2 (-2°C)	Песок мелкий	1-3	12	$\frac{0,16-0,22}{0,19}$	$\frac{1,93-2,02}{1,98}$	-	-	$\frac{0,01-0,10}{0,04}$	$\frac{0,01-0,02}{0,014}$
	Суглинок	1-5	29	$\frac{0,26-0,95}{0,54}$	$\frac{1,29-1,91}{1,59}$	$\frac{0,25-0,44}{0,34}$	$\frac{0,16-0,31}{0,24}$	$\frac{0,07-0,40}{0,21}$	$\frac{0,11-0,77}{0,36}$
	Супесь	1-3	13	$\frac{0,17-0,48}{0,30}$	$\frac{1,67-1,98}{1,83}$	$\frac{0,20-0,28}{0,24}$	$\frac{0,16-0,25}{0,19}$	$\frac{0,03-0,10}{0,08}$	$\frac{0,03-0,12}{0,07}$
3 (-2°C)	Супесь	2-9	6	$\frac{0,15-0,32}{0,24}$	$\frac{1,61-1,89}{1,80}$	$\frac{0,20-0,26}{0,23}$	$\frac{0,16-0,22}{0,19}$	$\frac{0,006-0,08}{0,02}$	$\frac{0,06-0,11}{0,08}$
	Суглинок	2-9	10	$\frac{0,23-0,46}{0,34}$	$\frac{1,56-1,97}{1,70}$	$\frac{0,26-0,37}{0,32}$	$\frac{0,19-0,28}{0,24}$	$\frac{0,005-0,19}{0,09}$	$\frac{0,04-0,25}{0,12}$
4 (-4°C)	Глина	2,5-6	17	$\frac{0,23-0,54}{0,41}$	$\frac{1,49-2,02}{1,71}$	$\frac{0,36-0,51}{0,45}$	$\frac{0,21-0,30}{0,25}$	$\frac{0,02-0,21}{0,09}$	$\frac{0,18-0,95}{0,37}$
	Суглинок	2,5-6	15	$\frac{0,18-0,54}{0,37}$	$\frac{1,56-1,98}{1,74}$	$\frac{0,24-0,45}{0,35}$	$\frac{0,15-0,34}{0,23}$	$\frac{0,01-0,21}{0,08}$	$\frac{0,06-0,46}{0,23}$

	Вид грунта	Глубина отбора, м	Количество опытов	W_c , д.е	ρ , г/см ³	W_L , д.е.	W_p , д.е	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
	Супесь	2,5-6	13	$\frac{0,19-0,57}{0,29}$	$\frac{1,68-2,02}{1,83}$	$\frac{0,18-0,28}{0,24}$	$\frac{0,12-0,24}{0,19}$	$\frac{0,01-0,12}{0,05}$	$\frac{0,05-0,26}{0,13}$
5	Суглинок	1-5	38	$\frac{0,28-1,46}{0,72}$	$\frac{1,10-1,83}{1,50}$	$\frac{0,29-0,48}{0,35}$	$\frac{0,18-0,36}{0,24}$	$\frac{0,02-0,56}{0,27}$	$\frac{0,05-0,51}{0,20}$
(-5°C)	Супесь	1-6	12	$\frac{0,17-0,96}{0,51}$	$\frac{1,23-1,98}{1,66}$	$\frac{0,23-0,35}{0,27}$	$\frac{0,16-0,23}{0,20}$	$\frac{0,003-0,58}{0,22}$	$\frac{0,02-0,20}{0,10}$
6	Песок пылев.	1-4,5	20	$\frac{0,15-0,35}{0,22}$	$\frac{1,50-1,92}{1,69}$	-	-	$\frac{0,03-0,34}{0,12}$	$\frac{0,04-0,09}{0,06}$
(-3°C)	Суглинок	1-4,5	34	$\frac{0,17-1,40}{0,42}$	$\frac{1,22-1,97}{1,51}$	$\frac{0,24-0,45}{0,35}$	$\frac{0,15-0,34}{0,23}$	$\frac{0,03-0,54}{0,18}$	$\frac{0,08-0,33}{0,15}$
	Супесь	1-4,5	15	$\frac{0,19-0,33}{0,25}$	$\frac{1,49-1,84}{1,69}$	$\frac{0,18-0,28}{0,24}$	$\frac{0,12-0,24}{0,19}$	$\frac{0,04-0,19}{0,10}$	$\frac{0,07-0,25}{0,12}$
7	Песок пылев.	1,5-4,5	15	$\frac{0,18-0,43}{0,24}$	$\frac{1,73-2,05}{1,91}$	-	-	$\frac{0,007-0,18}{0,06}$	$\frac{0,02-0,07}{0,04}$
(-1°C)	Суглинок	1-6	43	$\frac{0,17-0,47}{0,29}$	$\frac{1,22-2,07}{1,82}$	$\frac{0,20-0,37}{0,29}$	$\frac{0,08-0,23}{0,17}$	$\frac{0,01-0,32}{0,12}$	$\frac{0,03-0,67}{0,22}$
	Супесь	1-6	10	$\frac{0,16-0,26}{0,21}$	$\frac{1,89-2,05}{1,97}$	$\frac{0,18-0,24}{0,22}$	$\frac{0,14-0,21}{0,17}$	$\frac{0,01-0,10}{0,05}$	$\frac{0,03-0,16}{0,08}$
8	Суглинок	2,5-6	14	$\frac{0,16-1,10}{0,46}$	$\frac{1,31-1,96}{1,69}$	$\frac{0,21-0,37}{0,29}$	$\frac{0,10-0,24}{0,17}$	$\frac{0,05-0,41}{0,19}$	$\frac{0,04-0,27}{0,14}$
(-2°C)	Супесь	2,5-6	10	$\frac{0,25-0,92}{0,49}$	$\frac{1,36-1,99}{1,60}$	$\frac{0,22-0,33}{0,29}$	$\frac{0,19-0,27}{0,24}$	$\frac{0,03-0,48}{0,26}$	$\frac{0,03-0,19}{0,11}$

* в числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменатели – средние значения

Исследования влияния условий оттаивания (одностороннего и всестороннего) выполнялись на модельных образцах (350 опытов) с задаваемыми значениями плотности и влажности. Для этих испытаний использовались грунты, отобранные в Таз-Енисейской области с глубины до 5 м. Минеральный состав грунтов определялся методом рентгеновской дифрактометрии в лаборатории кристаллохимии минералов им. Белова ИГЕМ РАН (Рентгеновский дифрактометр: D/МАХ-2200, фирмы Rigaku). Гранулометрический состав определялся ареометрическим методом для глинистых грунтов и ситовым методом для песчаных [17]. Результаты анализов приведены в таблице 2.2-2.3.

Таблица 2.2

Геолого-генетическая характеристика и минеральный состав исследуемых грунтов

Наименование породы	Генезис, возраст	Минеральный состав, %	
Песок	<i>pt Q_{III} kz</i>	80,7	кварц
		13,1	альбит
		6,2	микроклин
Супесь	<i>m, gm Q_{II} sh</i>	75,1	кварц
		9,5	альбит
		8,2	микроклин
		5,2	антофиллит
		1,5	иллит
		0,5	смектит
Суглинок	<i>m, gm Q_{II} sh</i>	51	Кварц
		15	альбит
		13	микроклин
		10	хлорит
		7	иллит
		3	каолинит
		1	смектит

Названия грунтам давались по ГОСТ 25100-2011 [19].

Песок кварцевый верхнеплейстоценового возраста прибрежно-морского генезиса казанцевской свиты (*pt Q_{III} kz*). Песок темно-серого цвета, хорошо сортированный. Плотность твердой компоненты составляет 2,65 г/см³.

Супесь среднеплейстоценового возраста морского, ледниково-морского генезиса салехардской свиты (*m, gm Q_{II} sh*). Супесь коричневого цвета. Плотность твердой компоненты составляет 2.69 г/см³. Нижний предел пластичности равен

0,136 д.е., а число пластичности 0,048 д.е.

Таблица 2.3

Гранулометрический состав исследуемых грунтов

Содержание частиц в каждой фракции, %								Название грунтов (ГОСТ 25100-2011)
Диаметр частиц, мм								
1 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,1	0,1 - 0,05	0,05 - 0,01	0,01 - 0,005	0,005 - 0,001	< 0,001	
1	4	47	32	6	4	4	2	Песок пылеватый
1	4	63	14	8	4	4	2	Супесь песчанистая
1	1	10	25	30	13	10	10	Суглинок легкий пылеватый

Суглинок среднеплейстоценового возраста морского, ледниково-морского генезиса салехардской свиты (*m, gm Q_{II} sh*). Суглинок серого цвета. Плотность твердой компоненты составляет 2,71 г/см³. Нижний предел пластичности равен 0,20 д.е., а число пластичности 0,095 д.е.

Диапазон изменений влажности и плотности для песчаных и глинистых модельных образцов был принят по данным лабораторных исследований грунтов, отобранных в Таз-Енисейской области. Так в песках минимальное значение плотности 1,94 г/см³ при влажности 25 % (W=25%) , а максимальное - 1,99 г/см³ при W=18 %. Минимальное значение влажности у суглинка - 30 % при плотности 1,86 г/см³, а у супеси - 18% при плотности 1,98 г/см³. Максимальное значение влажности супеси и суглинка принято как среднее для данных видов грунтов в районе исследований, при этом их льдистость не превышала 0,4. Вследствие этого максимальная влажность суглинка была принята 40% при плотности 1,74 г/см³., а для супеси - 28 % при плотности 1,91 г/см³ (таблица 2.4)

Исследования выполнялись для массивной и слоистой криогенной текстуры с одним шпиром льда размером 2 мм (в соответствии с ГОСТ 12248-2010 допускающим толщину прослоек льда в образце не более 2 мм) и тремя шпиром размерами 0,065 мм. При этом плотность и влажность образцов массивной и слоистых криогенных текстур были одинаковые, что позволило оценить влияние криогенной текстуры на деформационные характеристики.

В связи с существенным влиянием плотности и влажности на

деформационные характеристики мерзлых грунтов при оттаивании выполнялась статистическая обработка их значений как для условий одностороннего, так и всестороннего оттаивания. Полученные результаты представлены в таблице 2.4.

Как можно видеть, коэффициент вариации для влажности не превышает 3%, а плотности 1 %. Наибольшие значения коэффициента вариации характерны для глинистых образцов.

Таблица 2.4

Статистическая обработка величин влажности и плотности исследуемых грунтов

(влажность - W_{tot} , плотность - ρ , коэффициент вариации - V)

№	Количество образцов	Среднее значение		Коэффициент вариации, д.е.	
		W_{tot} , д.е.	ρ , г/см ³	W_{tot}	ρ
песок					
1	12	0,18	1,99	0,01	0,01
2	12	0,25	1,94	0,02	0,01
супесь					
1	12	0,18	1,98	0,02	0,01
2	36	0,28	1,91	0,03	0,01
суглинок					
1	12	0,30	1,86	0,02	0,01
2	36	0,40	1,74	0,03	0,01

Выводы

Грунты ненарушенного сложения имеют различный генезис и большой разброс показателей физических и деформационных характеристик, что связано с большим разнообразием строения и криогенных текстур испытанных образцов. Поэтому полученные данные могут быть использованы для разработки экспресс методик расчета осадок.

Приготовленные для испытаний модельные образцы обладают некоторым разбросом в плотности и влажности, что тем не менее позволяет выявить общие закономерности влияния условий оттаивания на деформационные характеристики.

Глава 3. Методика исследований и обработки опытных данных

3.1. Экспериментальные исследования

За основу проведения экспериментальных исследований была взята стандартная методика компрессионного сжатия мерзлых грунтов при оттаивании [16] с учетом рекомендаций, разработанных Н.А. Цытовичем [88]. Процесс осадки мерзлого грунта при оттаивании исследовался в условиях сжатия без возможности бокового расширения.

Образцы мерзлого грунта имели ненарушенное сложение, с природной влажностью и льдистостью и форму цилиндра (диаметр 71 мм, высота 35мм). Подготовка образцов производилась в холодильной камере при отрицательной температуре путем вдавливания в керн металлических колец, предварительно смазанных вазелином, при помощи гидравлического пресса. Затем в холодильной камере образец переносился в рабочее кольцо прибора, предварительно охлажденного и выдержанного вместе с образцом в холодильной камере в течение не менее 12 часов при температуре испытаний. Одометр устанавливался на станину под пресс и центрировался.

Испытания по определению деформационных характеристик оттаивающих грунтов проводились в три этапа:

I этап - уплотнение мерзлого образца при отрицательной температуре природной нагрузкой

II этап - оттаивание образца при этой же нагрузке.

Уплотнение мерзлого и оттаивающего образца проводится до условной стабилизации. За условную стабилизацию принимается изменение показаний индикатора, равное 0,01 мм за 12 ч.

В период оттаивания образца замеряют деформацию через 5 мин после начала, затем через каждые 10 минут до двух часов, затем 4, 6, 8, 24 ч. и до условной стабилизации деформации.

III этап - уплотнение оттаявшего образца ступенчато-возрастающей нагрузкой. После стабилизации деформаций оттаявшего грунта нагрузку

увеличивали на 0,05 МПа для глинистых грунтов и на 0,075 МПа для песчаных грунтов. Каждая ступень нагрузки удерживалась до условной стабилизации осадки, которая принимается также равной 0,01 мм за 12 часов.

Общее количество ступеней было пять.

Суммарная величина деформации грунта с учетом деформации прибора, определенная по показаниям индикаторов, записывалась в рабочий журнал.

По полученным данным рассчитывалась относительная деформация грунта равная отношению абсолютной деформации (S , мм) к первоначальной высоте образца (h , мм).

Строился график изменения относительной деформации грунта во времени при каждой ступени нагрузки, по которому определялась величина стабилизированной деформации (рисунок 3.1.-а). По значениям стабилизированной деформации грунта определялась зависимость относительной осадки от напряжения (рисунок 3.1.-б) и деформационные характеристики оттаивающего грунта: коэффициент оттаивания (A), равный относительной стабилизированной осадке оттаивания без нагрузки, и коэффициент сжимаемости (m), угол наклона прямой к оси абсцисс (рисунок 3.1. -б).

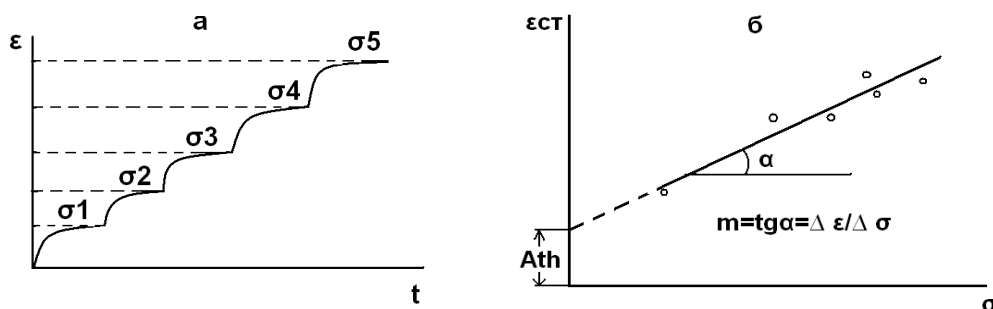


Рисунок 3.1. Зависимости развития относительной осадки от времени при каждой ступени нагружения (а), стабилизированной осадки от напряжения (б)

После завершения испытаний образец с грунтов взвешивался и высушивался в сушильном шкафу для расчета влажности до и после оттаивания [20].

Для установления влияния условий оттаивания (одностороннего или всестороннего) на деформационные характеристики использовались модельные образцы для обеспечения одинаковых условий приготовления и испытания.

Методика модельных испытаний была следующая.

Приготовление образцов. Образцы имели форму цилиндра диаметром 71 мм и высотой 35 мм. Испытывались три вида грунтов: песок, супесь и суглинок. Диапазон изменений влажности и плотности образцов был принят по данным лабораторных исследований грунтов, отобранных в Таз-Енисейской области.

В каждом опыте использовались три образца с одинаковой влажностью и плотностью. При этом были приготовлены образцы с массивной и слоистой криогенной текстурой. Грунты ненарушенного сложения, высушенные в сушильном шкафу, просеивались через сито диаметром 2 мм. Охлажденный измельченный воздушно-сухой порошок грунта укладывался на поднос слоем 2-3 см, а затем неоднократно увлажнялся дистиллированной водой и перемешивался шпателем, чтобы не образовывались комки, до получения исходной влажности. Для получения заданного значения влажности в грунт необходимо добавить расчетное количество воды Q_p , см³, определяемое по формуле [15]:

$$Q_p = \frac{m_T (W_3 - W)}{\rho_w (1 + W)} \quad (3.1)$$

где m_T - масса исследуемого грунта при влажности W , г; W_3 и W - соответственно заданная и исходная влажности грунта, д.е.; ρ_w - плотность воды, равная 1 г/см³.

Полученная грунтовая масса в условиях изоляции выстаивалась в течение суток для равномерного распределения влаги. Проводился отбор проб для контроля влажности. В исходном состоянии грунтовая масса характеризовались равномерным распределением влажности.

Затем образцы формировались методом послойного уплотнения в трех кольцах (внутренняя поверхность смазывалась тонким слоем вазелина) и определялась плотность. Масса грунта, которая в объеме рабочего кольца обеспечит заданную плотность скелета грунта ρ_{d3} , по формуле

$$m_T = V_k \rho_{d3} (1 + W_3) \quad (3.2)$$

где m_T - масса исследуемого грунта, г; V_k - внутренний объем рабочего

кольца, см^3 ; W_z - заданная влажность грунта, д.е.; ρ_{d3} - заданная плотность скелета грунта, $\text{г}/\text{см}^3$.

Образцы массивной криогенной текстуры замораживались в холодильной камере с температурой -10°C и выдерживались в течение суток. Слоистая текстура создавалась путем послойного добавления воды на мерзлую поверхность грунта. При этом были приготовлены два вида слоистой криогенной текстуры с одним шлиром (размер шлира 2 мм) и тремя шлирами (с размером 1 шлира 0,065 мм). При этом влажность для всех образцов была одинаковая. Для слоистых криогенных текстур это достигалось за счет уменьшения влажности минеральных прослоев. Примеры полученных криогенных текстур образцов показаны на рисунках 3.2-3.4.



Рисунок 3.2. Образец суглинка с массивной криогенной текстурой.

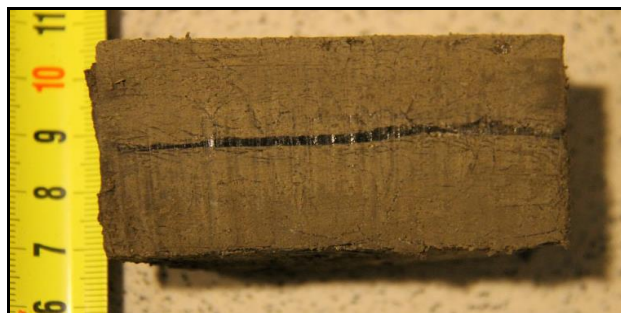


Рисунок 3.3. Образец супеси со слоистой криогенной текстурой (1 шлир).



Рисунок 3.4. Образец супеси со слоистой криогенной текстурой (3 шлира).

Затем образец, отшлифованный с торцов, взвешивался для определения плотности и влажности. После подготовки образец устанавливался в рабочее

кольцо прибора. Одометр с рабочим кольцом охлаждался в течение 24 часов в холодильной камере при температуре -2°C . Собранный одометр в холодильной камере устанавливался под рычаг.

Проведение испытаний. Ступени нагрузок в опытах принимались в соответствии с ГОСТ 12248-2010: максимальное значение напряжения на первой ступени задавалось 0,2 МПа для песчаных, 0,1 МПа для глинистых образцов, а минимальное значение 0,025 МПа для всех образцов.

Исследования при одностороннем оттаивании выполнялись в одометрах, изготовленных из капролона (нетеплопроводного материала - теплопроводность 0,23 Вт/мК), что обеспечивало тепловую изоляцию образцов по боковой поверхности и нижнему торцу (размер стенок корпуса 3 см) (рисунок 3.5 б), а также обычных компрессионных приборах, обеспечивающих всестороннее оттаивание (рисунок 3.5 а). Именно на этих двух приборах создавались разные условия оттаивания.

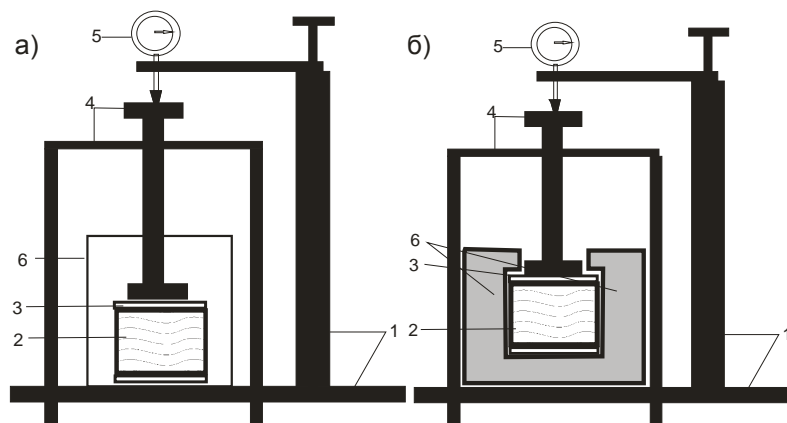


Рисунок 3.5. Схема приборов (а) всестороннее, б) одностороннее оттаивание) 1- станина; 2 – кольцо с грунтом; 3 – перфорированный штамп; 4 – система рычагов для подачи нагрузки; 5 - индикатор; 6 – а) внешний цилиндр б) нетеплопроводный корпус.

При этом важной задачей являлось использование одинаковых приборов для проведения исследований. Первоначальные исследования показали, что после испытаний, проведенных в одометре Н.А. Цытовича и обычном компрессионном приборе, влажность после оттаивания и уплотнения при разных условиях оттаивания отличалась практически в 2 раза в идентичных образцах. Указанное отличие обусловлено не одинаковой фильтрационной способностью приборов,

что значительно повлияло на значения деформационных характеристик [109]. Поэтому были изготовлены приборы, имеющие одинаковые составные части, отличающиеся только нетеплопроводным корпусом, изготовленным из капролона при одностороннем оттаивании.

Для каждого прибора была проведена его тарировка. Вместо грунта в прибор закладывался металлический диск и бумажный фильтр, затем производилась загрузка прибора ступенями и измерялась его деформация на каждой ступени нагрузки. По полученным данным строился график зависимости абсолютной деформации от напряжения (рисунок 3.6).

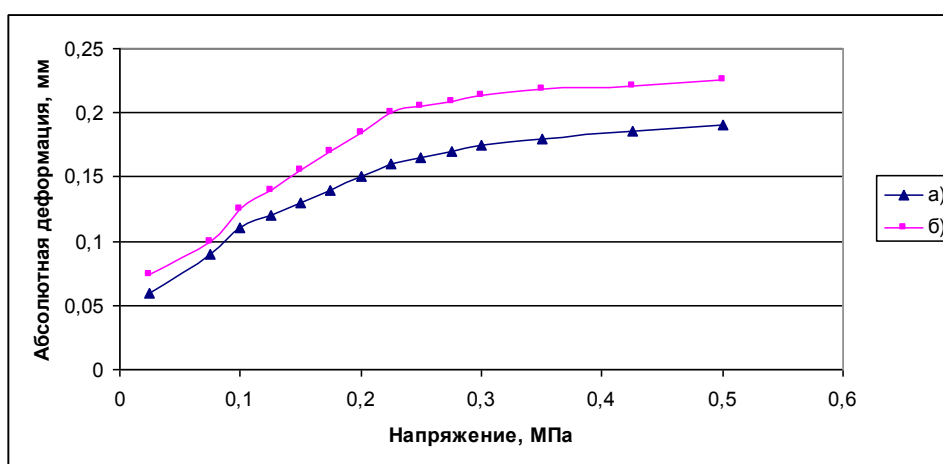


Рисунок 3.6. Кривые тарировки компрессионных приборов для а) всестороннего б) одностороннего оттаивания

Все испытания проводились при односторонней фильтрации воды, так как в природных условиях в большинстве случаев отток влаги происходит только сверху. Кроме этого, как показали исследования [7,24,36,43,58,61,68,71,75] значения деформационных характеристик в лабораторных условиях в основном больше, чем в полевых, поэтому уменьшение осадки за счет односторонней фильтрации должно сократить эту разницу.

С целью уменьшения времени испытаний температура в камере повышалась мгновенно до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем поддерживалась постоянной в течение всего опыта. Как показали выполненные исследования, при одностороннем оттаивании при температуре $+2$ и $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения деформационных характеристик суглинка ($W=0,4$ д.е. $1,74\text{ г/см}^3$) отличаются незначительно. Но при этом высокая скорость оттаивания обуславливает быструю консолидацию грунтов, что приводит к

сокращению времени испытаний на 24-36 ч.

Опыты проводились с трехкратной повторностью. Для обоснования такой повторности использовался метод приближенного расчета объема выборки [41]. В соответствии с этой методикой для расчета минимального количества опытов необходимо располагать следующей информацией:

- значением коэффициента вариации – V (коэффициент вариации для проведенных испытаний не превышал 0,14);
- значением допустимой погрешности ($K_{доп}$) в процентах (для компрессионных испытаний погрешность не превышала 15 %).

По имеющимся данным необходимое минимальное число опытов рассчитывалось по формуле (3.3) с надежностью (P) 95 %. В результате расчета получено значение 3,35, поэтому достаточно только три повторности. Формула 3.3 справедлива для отношения $K_{доп}/V$ в интервале от 0,4 до 1,4, при заданных значениях оно равно 1,07.

$$n_{\min} = \frac{1}{0.260016(K_{доп} / V)^2} \quad (3.3)$$

Всего было выполнено 24 компрессионных испытания для песка пылеватого, 96 компрессионных испытаний для глинистых грунтов.

Кроме исследования осадок оттаивающих грунтов, было проведено исследование изменения плотности и влажности после оттаивания. Для этого была принята следующая методика:

1. Подготовка 4-х одинаковых образцов (на пятом образце проводились исследования влияния условий оттаивания).

2. Уплотнение мерзлого образца и его оттаивание под давлением (0,025 МПа и 0,2 МПа для песчаных, 0,025 МПа и 0,1 МПа для глинистых грунтов). После условной стабилизации отбор одного образца для определения плотности и влажности после оттаивания.

3. Уплотнение оттаявшего образца ступенчато возрастающей нагрузкой (с отбором по одному образцу после каждой ступени нагрузки для определения плотности и влажности при уплотнении).

Определение коэффициента динамической вязкости мерзлых и

оттаивающих грунтов выполнялось методом вдавливания шарикового штампа конструкции НИС «Гидропроект», укомплектованных штампом диаметром 22 мм (рисунок 3.7).

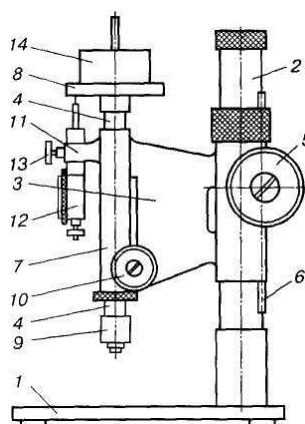


Рисунок 3.7. Одноштоковый сферический штамп конструкции НИС «Гидропроект»: 1 - опорная плита; 2 - направляющая стойка; 3 - консоль; 4 - верхний конец штока; 5 - нивелировочный винт; 6 – зубчатая рейка; 7 - направляющая муфта; 8 – площадка для размещения груза; 9 - шариковый штамп; 10 - стопорный винт; 11 – держатель индикатора; 12 - индикатор для измерения деформаций; 13- зажимной винт; 14 – груз

На первом этапе вдавливания шарикового штампа идет разрушение структуры и интенсивное уплотнение. По мере увеличения отпечатка шарика, происходит уменьшение напряжений, снижается скорость деформации и только на этом участке реологической кривой ползучесть можно условно принять соответствующей представлениям о «шведовой» вязкости. Как показано в статье Л.Т. Роман [69], определение динамической вязкости грунтов вдавливанием шарикового штампа является целесообразным.

С.С. Вяловым [12] отмечено, что метод шарикового штампа для определения вязкости следует использовать только в диапазоне шведовой вязкости, определяемой по реологической кривой от σ_t до σ_s (рисунок 3.8). Реологические кривые для грунтов по данным таких испытаний можно построить в координатах $\dot{S}_t - \sigma_t$, где \dot{S}_t – скорость погружения шарикового штампа, σ_t – напряжение, определяемое по площади отпечатка шарика в каждый момент времени при постоянной нагрузке P : $\sigma_t = \frac{P}{\pi d S_t}$.

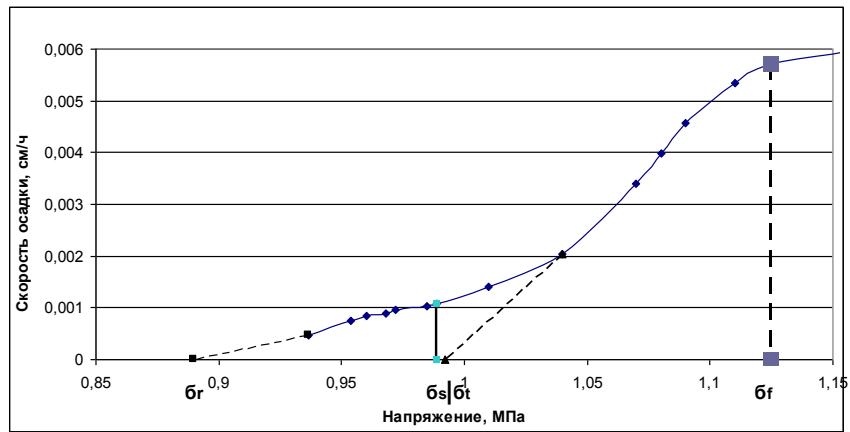


Рисунок 3.8. Пример реологической кривой суглинка по данным вдавливания шарикового штампа (суглинок пылеватый $\rho=1,87 \text{ г/см}^3$, $W_{\text{tot}}=0,30$ д.е., $\theta=-2^\circ\text{C}$)

Определялась вязкость, соответствующая значению скорости осадки шарика при напряжении σ_s в связи с тем, что в этом случае величина динамической вязкости будет иметь наибольшее значение.

Испытания проводились по следующей схеме. После оттаивания и уплотнения образцы помещались на опорную плиту прибора и центрировались относительно шарикового штампа. С помощью нивелировочного винта штамп подводился к образцу. Шток штампа закреплялся стопорным винтом. Индикатор для измерения деформации устанавливался в «нулевое положение». На грузовую площадку прикладывался груз.

Одновременно с пуском секундомера поворотом стопорного винта через шариковый штамп нагрузка передавалась на образец и через определенные промежутки времени от начала загрузки измерялась глубина вдавливания шарикового штампа в грунт.

Испытания образца шариковым штампом выполняются при одной, постоянной в течение всего опыта, нагрузке, которая назначается с соблюдением условия ограничения 15-минутной осадки $0,005d < S_{15} < 0,05d$.

В результате испытаний шариковым штампом определялась глубина погружения штампа S_t с точностью до 0,01 мм. По полученным значениям S_t в различные моменты времени вычислялись соответствующие значения C_{eq} по формуле:

$$C_{eq} = 0,06k \frac{P}{d S_t} \quad (3.4)$$

где C_{eq} – эквивалентное сцепление, МПа; P – нагрузка на штамп, кН; $d_{\text{в}}$ – диаметр штампа, см; S_t – осадка штампа, см; k – безразмерный коэффициент при ускоренном испытании, равный 0,8, либо полученный из длительных испытаний.

Как показано в работах [52, 39, 12, 35] вязкость грунтов может быть определена путем погружения шарика на основе расчета по формуле Стокса:

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{гр}})d^2}{18\dot{S}} \quad (3.5)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ и $\rho_{\text{гр}}$ – плотность шарика с учетом приложенного груза и плотность грунта, г/см³; d – диаметр шарика, см; \dot{S} – постоянная скорость погружения шарика в грунт, см/с.

Следует учесть, что формула Стокса получена для ньютоновской жидкости с постоянным коэффициентом вязкости. Как указано выше грунт, как в талом, так и в мерзлом состоянии является нелинейной вязкой средой и значения η зависят от величины нагрузки и времени ее действия.

Всего было проведено около 200 компрессионных испытаний для определений плотности и влажности после оттаивания и уплотнения и испытаний шариковым штампом образцов массивной криогенной текстуры после оттаивания.

Статистическая обработка данных, полученных при экспериментальных исследованиях деформационных характеристик, проводилась в соответствии с ГОСТ 20522-96 [18]. Определялись нормативные значения (x_n), среднеквадратические отклонения характеристики (S) и коэффициент вариации (V), которые определялись по формулам:

$$x_n = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_n - x_i)^2} \quad (3.7)$$

$$V = \frac{S}{x_n} \quad (3.8)$$

где n – число определений характеристики; x_i – частные значения характеристики, получаемые по результатам отдельных i -х опытов.

3.2. Математическое моделирование

Для выявления влияния условий оттаивания на значения осадок, а также для сравнения данных лабораторных и полевых испытаний применялось математического моделирования.

Современные методы расчета направлены, в основном, на решение теплофизических задач и не рассматривают совместную оценку напряженно-деформированного состояния грунта при оттаивании. Этим требованиям отвечает программа «Termoground» [110], где задача решается в два этапа. Сначала выполняется решение тепловой задачи, в результате которой определяются температурные поля на каждый период времени. Вторым этапом решается задача определения осадки грунта в процессе оттаивания.

Процессы промерзания-оттаивания в программном модуле «Termoground» описываются уравнением теплопроводности с учетом фазовых превращений грунтовой воды в интервале отрицательных температур для нестационарного теплового режима в трехмерном грунтовом пространстве следующим уравнением:

$$\rho_d (C_{th(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (3.9)$$

где $C_{th(f)}$ - удельная теплоемкость талого или мерзлого грунта (Дж/кг·°С); ρ_d - плотность сухого грунта (кг/м³); T - температура (°С); t - время (с); L_0 - удельная теплота фазовых превращений “вода – лед” в расчете на единицу массы (Дж/кг); $\lambda_{th(f)}$ - теплопроводность талого или мерзлого грунта (Вт/м·°С); x, y, z - координаты (м); q_v - мощность внутренних источников тепла (Вт/м³); W_w - влажность незамерзшей воды в грунте.

Начальным условием для уравнения (3.9) является заданное значение поля температуры в исследуемой области $T(x, y, z)$ грунта в момент времени $t = t_0$.

Граничные условия могут быть заданы четырех видов.

Граничное условие 1 рода задает температуру на границе расчетной области как известную функцию времени и пространственных координат точек границы.

Условие 1 рода описывает идеальный тепловой контакт грунта с внешней средой, когда сопротивлением теплообмену можно пренебречь.

Условие 2 и 4 рода задает тепловой поток внутри области и на ее границах соответственно.

Граничным условием 3 рода описывается теплообмен, который устанавливает пропорциональность между разностью температур по разные стороны границы и плотностью теплового потока через нее. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом теплообмена.

Для решения тепловой задачи в программе «Termoground» принята нелинейная модель промерзающего, мерзлого и оттаивающего грунта, предложенная Н.А. Цытовичем и Я.А. Кроником [47, 48, 88, 125]. Эта модель позволяет учитывать изменение тепловой энергии, сохраненной в грунте в процессе промерзания-оттаивания с изменением температуры грунта. На рисунке 3.9 показана функция относительной энергии тепла грунтовой среды необходимой для передачи определенной температуры.

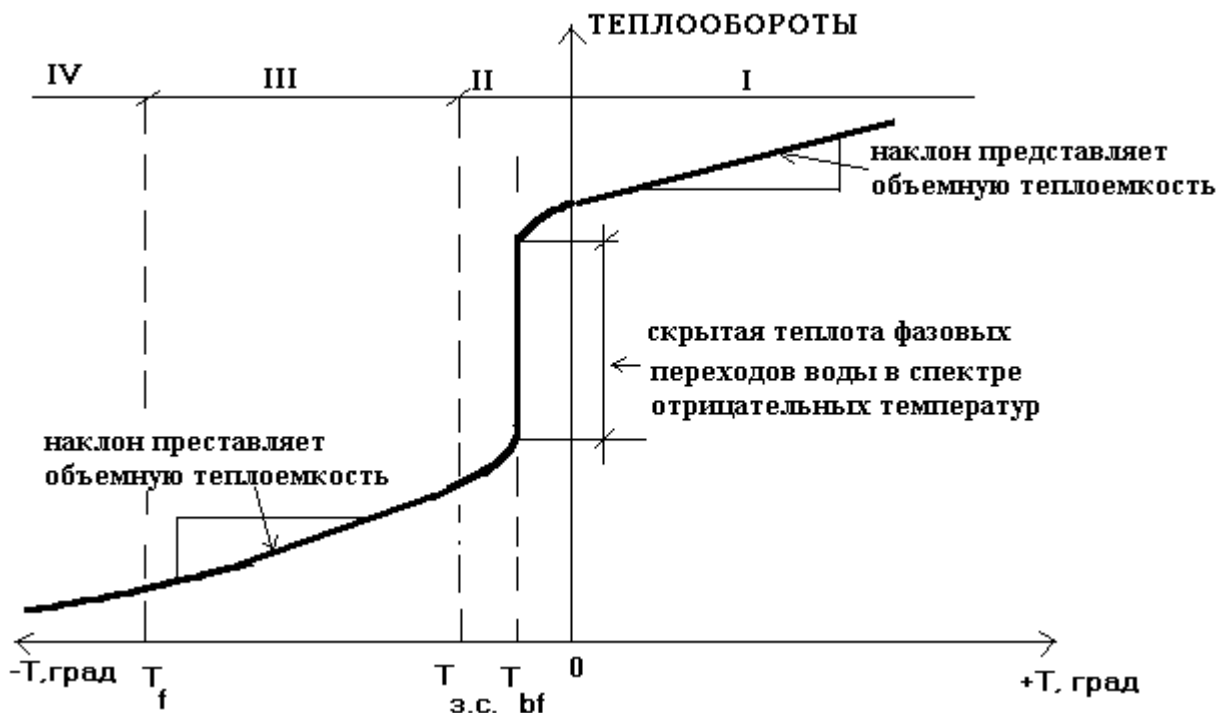


Рисунок 3.9. Функция теплооборотов грунта в процессе промерзания-оттаивания

Крутая часть функции в зоне начала промерзания-оттаивания грунта представляет скрытую теплоту фазовых переходов в спектре отрицательных

температур, поглощенную или отданную грунтом из-за изменений фазы грунтовой воды. Наклон функции справа и слева от зоны промерзания представляет объемную теплоемкость грунта мерзлых и талых зон [49].

Осадки оттаивающих грунтов определяются в программе двумя способами:

1. по результатам лабораторных исследований согласно ГОСТ 12248-2010, когда определяются деформационные характеристики грунта;
2. по зависимости, предложенной М.Ф. Киселевым [42], от показателей свойств замороженного грунта из следующего выражения:

$$d\varepsilon_{th} = \frac{W - W_p - K_d \cdot I_p}{\rho_w / \rho_s + W_{tot}} \quad (3.10)$$

где I_p – число пластичности; ρ_w – плотность воды; ρ_s – плотность частиц грунта; K_d – коэффициент уплотняемости, зависящий от дисперсности глинистого грунта и уплотняющего давления при оттаивании по следующему уравнению:

$$K_d = a \cdot I_p^{-b} + c \quad (3.11)$$

где a , b , c – эмпирические коэффициенты, зависящие от уплотняющего давления.

По физическому смыслу формула (3.10) представляет собой отношение объема оттаявшего под давлением грунта к его начальному объему в мерзлом состоянии.

Таким образом, можно оценить влияние условий оттаивания с использованием формулы М.Ф. Киселева. При этом стоит отметить следующее.

1. Формула М.Ф. Киселева применима при напряжениях 0,1-0,6 МПа. Поэтому расчеты выполнялись только для модельных образцов при нагрузке 0,1 МПа.

2. Формула М.Ф. Киселева не учитывает особенностей криогенной текстуры грунтов, поэтому расчеты выполнялись только для образцов массивной криогенной текстуры.

Назначение граничных условий и свойств грунтов. Для решения тепловой задачи оттаивания грунта в лабораторных условиях принималась осесимметричная схема, которая представляла собой четвертую часть кольца с

радиусом 35,5 мм и высотой 35 мм, состоящая из 2000 конечных элементов.

В качестве исходного грунта были взяты супесь и суглинок, на которых проводились модельные исследования. Теплофизические характеристики пород, необходимые для расчета, принимались по СП 25.13330.2012 [72]. Значения характеристик, используемых в расчетах, приведены в таблице 3.1. Воздействие температуры на грунт задавалось специальным элементом – «теплообмен по четырехугольнику». Использование данного элемента приводит к наиболее точным результатам при решении мелкомасштабных задач [57]. Теплообмен по четырехугольнику является граничным условием 3-его рода. Параметрами элемента является температура и коэффициент теплоотдачи. Начальная температура образца была принята равной -2°C . На каждом шаге решения на модель воздействовала постоянная температура $+20^{\circ}\text{C}$.

Значение коэффициента теплоотдачи было принято равным $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$. Процесс оттаивания на двухчасовом отрезке времени разбивался на 96 частей (первые 1,5 ч решения через каждую минуту, оставшаяся часть через 5 минут).

Для условий одностороннего оттаивания в верхней части, где происходит взаимодействие металлического штампа с грунтом, были заданы условия 3 рода, а во всех остальных частях условия 2 рода с нулевым теплотокотом. Для всестороннего оттаивания в верхней, нижней частях и по стенкам, где происходит взаимодействие металла с грунтом, были заданы условия 3 рода, в остальных частях - условия 2 рода с нулевым теплотокотом (рисунок 3.10). Таким образом, было получено распределение температур внутри образца на каждый момент времени.

Решение тепловой задачи позволило установить скорость и период оттаивания при одностороннем и всестороннем оттаивании и сопоставить их. Полученные решения считывались при решении механической задачи. Радиальные деформации исключались ввиду жесткости кольца. Штмп моделировался жесткими объемными упругими элементами (рисунок 3.11). На всем промежутке времени на грунт задавалась постоянная нагрузка $0,1 \text{ МПа}$.

Полевые штамповые испытания мерзлых грунтов при оттаивании для определения деформационных характеристик проводятся согласно ГОСТ [21].

Состав, физические и теплофизические свойства грунтов

Состав грунта	Суммарная влажность W_{tot} , д.е.	Влажность за счет незамерзшей воды $W_{нз}$, д.е.	Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³	Пластичность			Температура начала замерзания грунта, °С	Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость грунта, кДж/(м ³ ·°С)	
				влажность нижнего предела W_p , д.е.	влажность верхнего предела, W_L , д.е.	число пластичности I_p , д.е.		талого, λ_{th}	мерзлого, λ_f	талого, C_{th}	мерзлого, C_f
Супесь	0,18	0,05	1,68	0,136	0,183	0,047	-0,1	1,84	1,93	2660	2200
	0,28	0,05	1,49	0,136	0,183	0,047	-0,1	1,74	1,84	2940	2270
Суглинок	0,3	0,1	1,43	0,2	0,295	0,095	-0,2	1,45	1,57	3020	2180
	0,4	0,1	1,24	0,2	0,295	0,095	-0,2	1,57	1,8	3110	2120

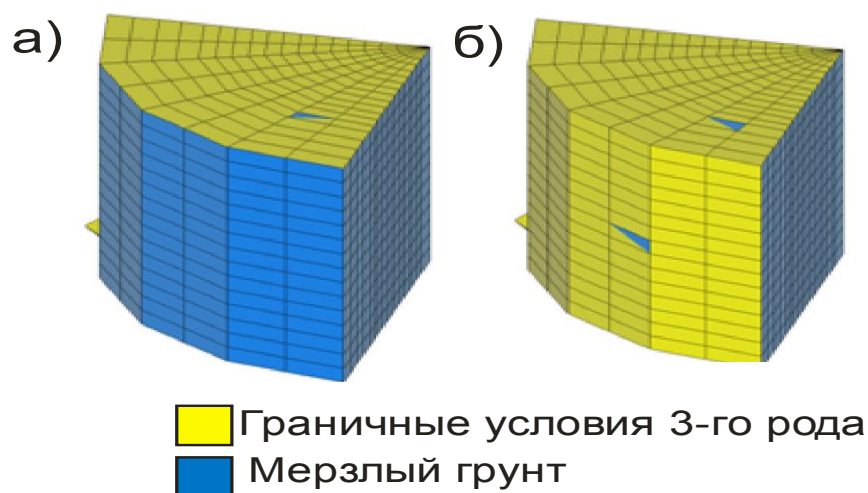


Рисунок 3.10. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи: а) одностороннего; б) всестороннего оттаивания

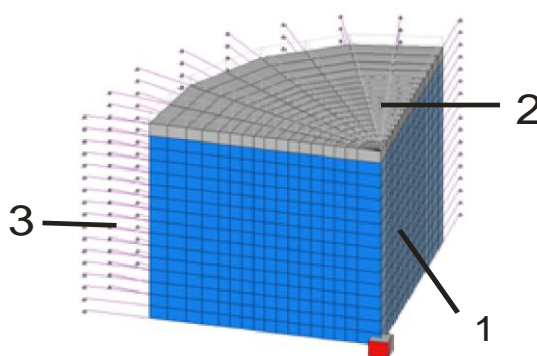


Рисунок 3.11. Фрагмент схемы для расчета механической задачи: 1- мерзлый грунт; 2- жесткий штамп; 3 – условия невозможности бокового расширения

Для прогноза деформационных характеристик был смоделирован процесс испытаний. В случае осесимметричной схемы мы взяли фрагмент схемы, которая приведена ниже для температурной задачи (рисунок 3.12).

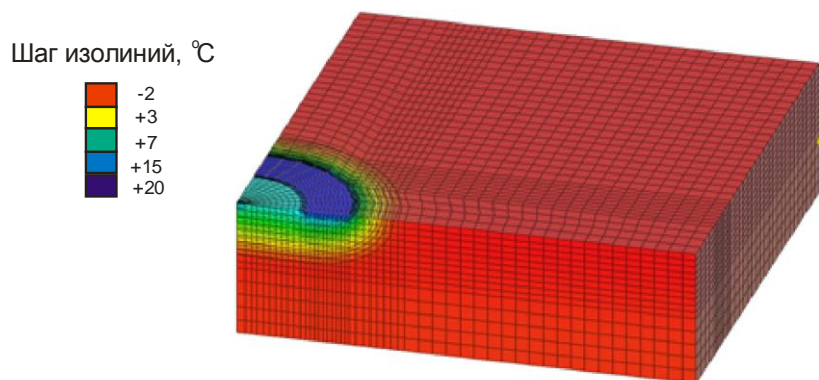


Рисунок 3.12. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи оттаивания под штампом

Количество конечных элементов составило около 25000. Схема

представляет собой квадрат с размером стороны 200 см и глубиной 120 см. На рисунке показан одна четвертая часть круглого штампа, радиус которого равен 40 см (общая площадь штампа 5000 см^2). Рядом со штампом находится обогревающее кольцо, размер которого 25 см (примерно $1/3$ диаметра штампа). Обогревающее устройство производит нагрев штампа и грунта, поэтому там задана постоянная температура $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. На самом же штампе было задано условие третьего рода с температурой $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ и коэффициентом теплоотдачи равным $14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$.

После достижения глубины оттаивания равной 40 см ($1/2$ диаметра штампа), расчет температурной задачи прекращался и производился расчет осадок. На каждом этапе расчета деформаций температуры с предыдущего этапа считывались. Штамп также моделировался жесткими объемными упругими элементами. На всем промежутке времени оттаивания на грунт действовала постоянная нагрузка $0,1 \text{ МПа}$.

Для проверки модели была рассчитана задача осадки штампа по исходным данным полевых исследований Пахомовой Г.М. [58]. Оттаивание суглинка происходило при температуре $-2 \text{ }^\circ\text{C}$. Влажность равнялась 35% , а плотность скелета грунта - $1,4 \text{ г}/\text{см}^3$. Супесь имела влажность 27% а плотность скелета - $1,34 \text{ г}/\text{см}^3$. Указанные характеристики близки с таковыми для модельных образцов.

3.3. Прогноз деформаций оттаивающих грунтов

В связи со значительной продолжительностью испытаний при определении деформационных характеристик оттаивающих грунтов, которые могут продолжаться от 5 дней до 3 недель практически важной задачей является сокращение этого периода. При этом необходимо обеспечить получение достоверных результатов.

Достижение указанной цели выполнялось на основе исследований, направленных на возможности математического описания процесса деформирования оттаивающих грунтов при уплотнении.

Многими авторами получено, что зависимость стабилизированных осадок

на каждой ступени нагружения от напряжения имеет в основном линейный характер для всех видов грунтов. Таким образом, можно использовать только 2 точки (2 ступени) для прогноза деформационных характеристик. Но так как деформационные характеристики зависят от большого числа факторов, то ГОСТом предусмотрено проведение пяти ступеней. Для математического описания зависимости протекания деформаций оттаявших грунтов во времени при различных ступенях нагружения использовались два подхода.

При **первом подходе** по данным испытаний оттаивающих грунтов устанавливалась зависимость деформаций от времени на каждой ступени нагружения, по которой строилось семейство кривых ползучести по опытным данным на второй и третьей ступеней. Деформация оттаивания исключалась из анализа ввиду значительной осадки и отличия характера деформирования при фазовом переходе.

Расчеты выполнялись по феноменологическим формулам степенного и логарифмического вида и уравнению деформирования С.С. Вялова, полученного из теории старения [12]. Параметры этих формул находились путем выравнивания кривых ползучести и изохронных кривых.

Рассмотрим методику определения параметров каждого уравнения.

Степенное уравнение может быть задано с различным числом параметров и с различными исходными допущениями. Следуя допущению о равенстве нулю мгновенной деформации, рассчитывалась относительная осадка после двух часов приложения новой нагрузки, когда происходило затухание фильтрационной стадии консолидации.

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{A_H} \right)^{1/m} \left(\frac{t}{T} \right)^\beta \quad (3.12)$$

где ε - относительная деформация, д.е.; t - время, мин; σ - нагрузка, МПа; A_H, m, T, β - опытные параметры.

Прологарифмировав данное уравнение получим:

$$\ln \varepsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma}{A_H} + \beta \ln \frac{t}{T}$$

Обозначив $Y = \ln \varepsilon; X = \ln t; B = \beta; D = \ln \left[\left(\frac{1}{T} \right)^\beta \left(\frac{\sigma}{A_H} \right)^{1/m} \right]$; получим линейное

уравнение вида $Y = BX + D$. Перестроив экспериментальные кривые в координатах $X - Y$, получим семейство прямых для каждого значения напряжения (рисунок 3.13-а). Среднее значение тангенса угла наклона этих прямых определит значение параметра β .

Для определения остальных параметров выравнивались изохронные кривые, принимая $Y = \ln \sigma; X = \ln \varepsilon$. В результате в координатах X, Y получим семейство прямых для различных моментов времени (рисунок 3.13- б). Среднее значение тангенсов углов наклона прямых $\ln \sigma - \ln \varepsilon$ определяют параметр m . Отрезок, отсекаемый ОУ определит величину $D_H = \ln A_H$, откуда находим значение $A_H = e^{D_H}$. Зная параметры β, m, A_H , можно вычислить величину T из выражения

$$D = -\ln \left[\frac{1}{A_H} \left(\frac{t}{T} \right)^{\beta m} \right]$$

Полученные параметры уравнения для песка ($W=0,17$ д.е., $\rho=1,97$ г/см³) представлены в таблице 3.2. Как можно видеть на графике зависимости относительной осадки от времени по экспериментальным данным и по данным расчета значения очень близки (рисунок 3.14).

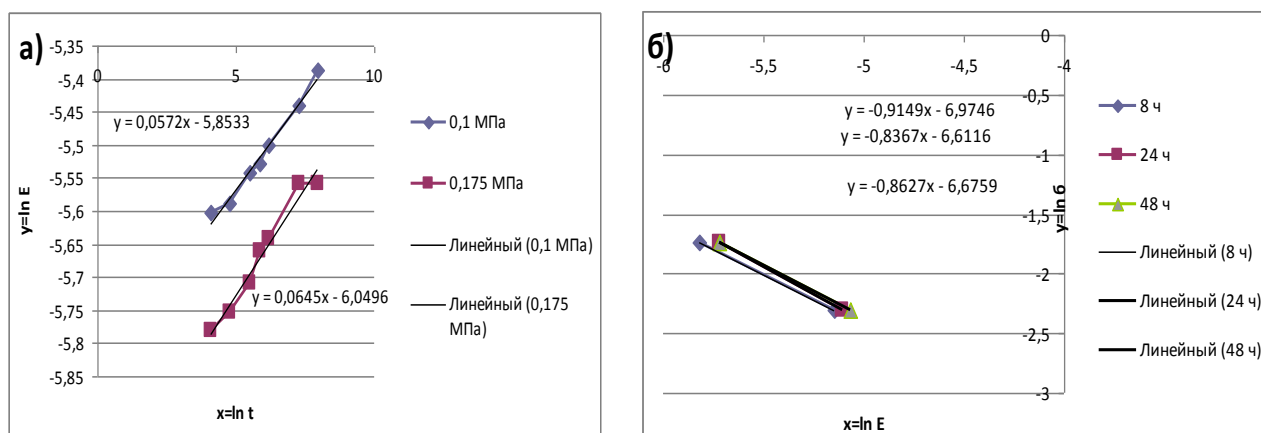


Рисунок 3.13. Графики для определения параметров степенного уравнения (на примере песка с $W= 17\%$, $\rho=1,97$ г/см³)

Параметры степенного уравнения

Параметры	A_n (МПа)	m	T (мин)	β
значения	0,0011	-0,87	1350	0,06

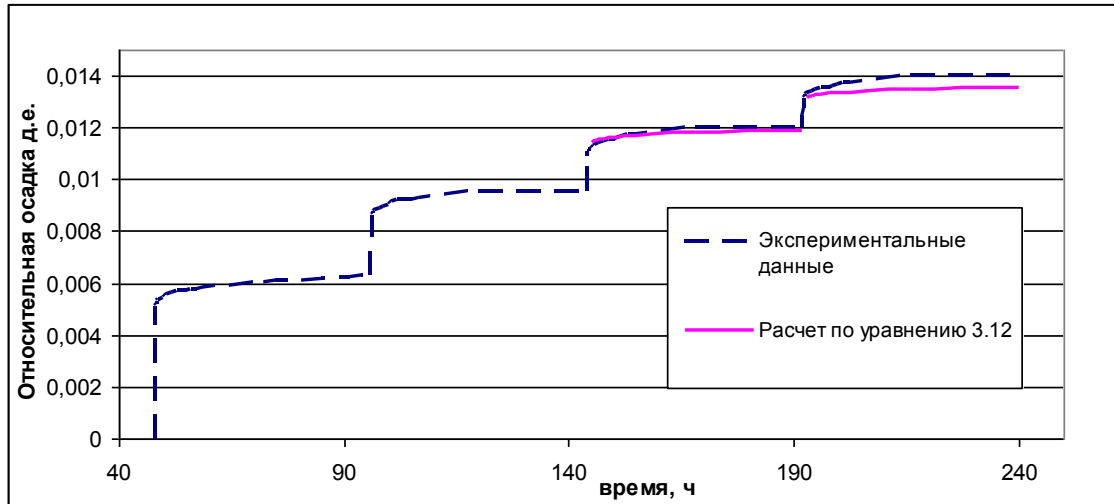


Рисунок 3.14. График зависимости относительной осадки от времени по экспериментальным данным и по данным расчета (на примере песка с $W=17\%$, $\rho=1,97$ г/см³)

Логарифмическое уравнение принято в следующем виде [12]:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma * \delta}{A_n} \right)^{1/m} \ln \left(\frac{t+T}{T} \right) \quad (3.13)$$

где ε - относительная деформация, д.е.; t - время, мин; σ - нагрузка, МПа; A_n, m, T, δ - опытные параметры.

Изохронные кривые выравниваются в координатах $Y = \ln \sigma$; $X = \ln \varepsilon$; , где $B = m$; параметр T берется произвольным, но с учетом наибольшего приближения расчетной кривой к экспериментальной (рисунок 3.15- а). Затем, приняв $Y = \frac{\varepsilon^{1/m}}{\sigma}$ $X = \ln[(t+T)/T]$ строится обобщенный график, на котором семейство кривых ползучести трансформируется в единую прямую, где определяются значения A_n и δ ($B = (1/A_n^{1/m})\delta$, а $D = 1/A_n^{1/m}$) (рисунок 3.15-б),

Полученные параметры логарифмического уравнения на основе экспериментальных данных приведены таблице 3.3. График зависимости относительной осадки от времени по экспериментальным данным и по данным

расчета представлен на рисунке 3.16.

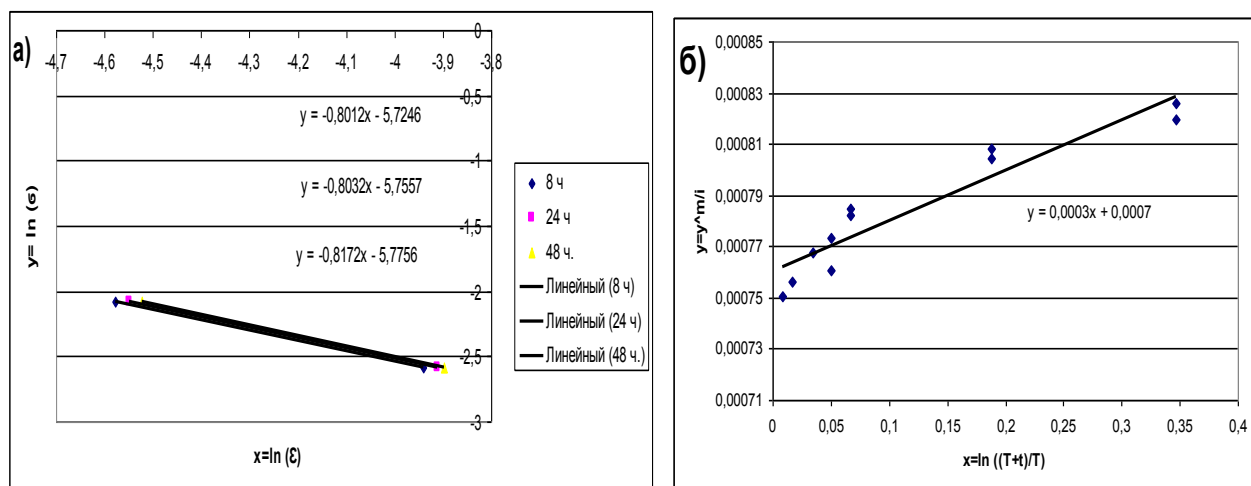


Рисунок 3.15. Графики для определения параметров логарифмического уравнения (на примере супеси с $W=28\%$, $\rho=1,89 \text{ г/см}^3$)

Таблица 3.3

Параметры логарифмического уравнения

Параметры	A_n (МПа)	m	T (мин)	b
значения	0,003	-0,81	6950	0,39

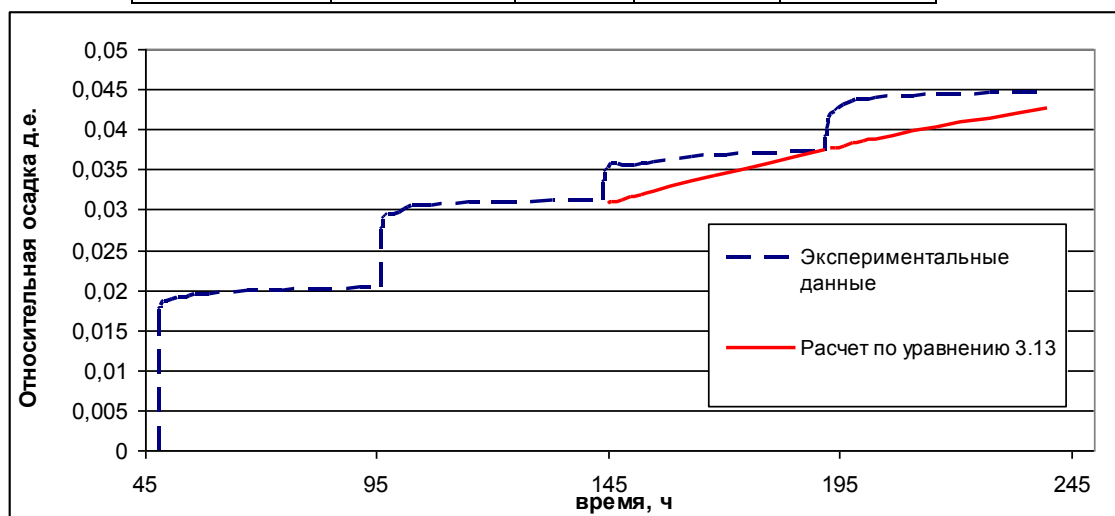


Рисунок 3.16. График зависимости относительной осадки от времени по экспериментальным данным и по данным расчета (на примере супеси с $W=28\%$, $\rho=1,89 \text{ г/см}^3$)

Уравнение С.С. Вялова [12], полученное на основе теории старения, имеет вид

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{\xi} \cdot t^\alpha \right)^{1/m} \quad (3.14)$$

где \mathcal{E} - относительная деформация, д.е.; t - время, мин; σ - нагрузка, МПа; ξ , m , α – опытные параметры.

Для проверки применимости уравнения и определения значения коэффициента m кривые ползучести перестраиваются в координатах $\ln \sigma - \ln \varepsilon$ (рисунок 3.17-а). Если изохронные кривые спрямляются в логарифмических координатах и полученные прямые взаимно параллельны, то уравнение справедливо для описания кривых ползучести. В этом случае параметры m_i для каждой прямой определяются как тангенсы угла наклона прямых к оси $\ln \varepsilon$, а расчетное значение m равно среднему арифметическому из m_i :

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$$

где n – количество полученных значений параметров m_i для различных моментов времени t .

Для определения коэффициентов ξ и α уравнение (3.14) преобразуется к виду:

$$\frac{\varepsilon^m}{\sigma} = \frac{1}{\xi} \cdot t^\alpha,$$

В результате логарифмирования получаем линейный вид этого уравнения:

$$\ln\left(\frac{\varepsilon^m}{\sigma}\right) = \ln\left(\frac{1}{\xi}\right) + \alpha \cdot \ln t$$

Для определения параметров уравнения строятся графики в координатах $\ln(\varepsilon^m/\sigma) - \ln t$ (рисунок 3.17-б). Параметр α определяется как тангенс угла наклона прямой к оси $\ln t$, а отрезок D , отсекаемый этой прямой на оси $\ln(\varepsilon^m/\sigma)$, равен величине $\ln(1/\xi)$. Откуда параметр $\xi = 1/e^D$.

Полученные значения параметров уравнения представлены в таблице 3.4. График зависимости относительной осадки от времени по экспериментальным данным и по данным расчета изображен на рисунке 3.18.

При **втором подходе** аппроксимировалась зависимость стабилизированных осадок, полученных по опытным данным первых трех ступеней нагружения, от времени с выполнением прогноза деформаций на четвертой и пятой с помощью

степенной, логарифмической, дробной-линейной формул, предложенных С.С. Вяловым [12]. При проведении экспериментов ступенчатое возрастание нагрузки принято одинаковым. Поэтому при подборе прогнозной формулы можно рассматривать только стабилизированную осадку и период ее достижения. Время достижения стабилизированных осадок четвертой и пятой ступени принималось таким же, как и на третьей.

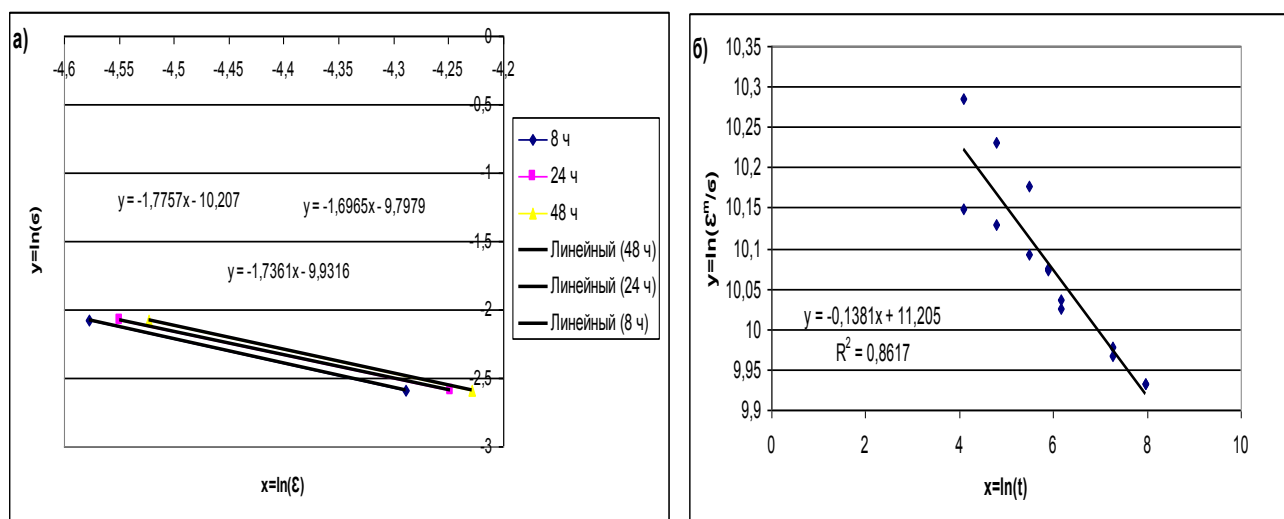


Рисунок 3.17. Графики для определения параметров уравнения деформируемости (на примере суглинка с $W = 30\%$, $\rho = 1,86 \text{ г/см}^3$)

Таблица 3.4

Параметры уравнения деформирования для суглинка

Параметры	ξ (МПа мин)	m	α
значения	0,0000136	-1,736	-0,1381

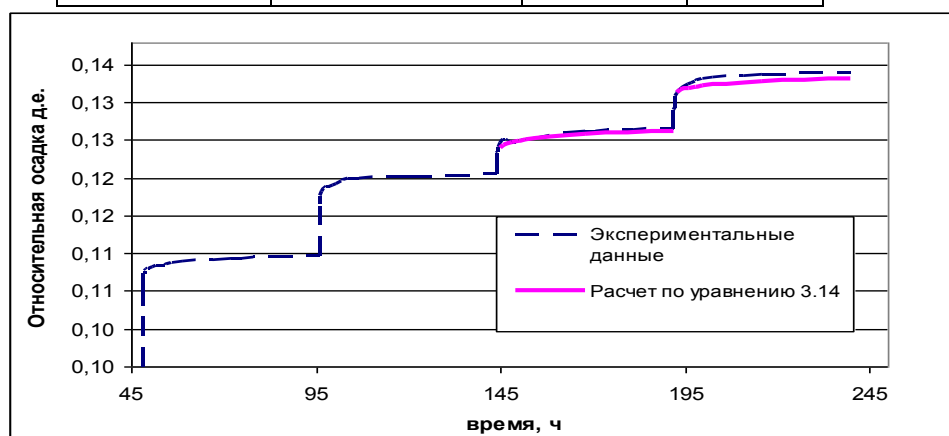


Рисунок 3.18. График зависимости относительной осадки от времени суглинка по экспериментальным данным и по данным расчета (на примере суглинка с $W = 30\%$, $\rho = 1,86 \text{ г/см}^3$)

Для определения параметров формул, применялся метод выравнивания опытных кривых, при котором нелинейные зависимости преобразовывались с помощью новых переменных X и Y в линейные зависимости, имеющие следующий вид:

$$Y=BX+D$$

Прямая должна проходить как можно ближе к экспериментальным точкам. Это возможно, когда сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от этой прямой по вертикали минимальна. В этом случае и с учетом нормального закона распределения ошибок параметры B и D находят из совместного решения двух уравнений [12]:

$$\begin{aligned} nD + B \sum_1^n X_i &= \sum_1^n Y_i \\ D \sum_1^n X_i + B \sum_1^n X_i^2 &= \sum_1^n X_i Y_i \end{aligned}$$

Где n – это число экспериментальных точек.

Из решения этого уравнения определяются значения параметров B и D .

$$\begin{aligned} B &= \frac{n \sum_1^n X_i Y_i - \sum_1^n X_i \sum_1^n Y_i}{n \sum_1^n X_i^2 - (\sum_1^n X_i)^2} \\ D &= \frac{\sum_1^n Y_i - B \sum_1^n X_i}{n} \end{aligned}$$

На основе вышеизложенного подхода была проведена аппроксимация опытной кривой степенной, логарифмической и дробно-линейной формулами.

Степенная формула имеет вид:

$$\mathcal{E}_t = S_n * t^B \quad (3.15)$$

где t – время, ч., \mathcal{E}_t – относительная деформация, д.е., B , S_n – опытные параметры ($S_n = e^D$).

Параметры формулы получены при преобразовании в новых координатах $X = \ln(t)$, $Y = \ln(\mathcal{E})$.

Логарифмическая формула имеет вид:

$$\mathcal{E}_t = D + B * \ln(t + 1) \quad (3.16)$$

где t – время, ч., ε_t – относительная деформация, д.е., B, D - опытные параметры.

Параметры формулы получены при преобразовании в новых координатах $X=\ln(t+1)$, $Y=\varepsilon$.

Дробно-линейная формула имеет вид:

$$\varepsilon_t = \frac{S_n * t}{T + t} \quad (3.17)$$

где t – время, ч., ε_t – относительная деформация, д.е., S_n, T – опытные параметры ($S_n = 1/B$, $T = S_n * D$).

Параметры формулы получены при преобразовании в новых координатах $X=t$, $Y= t/\varepsilon$.

Обобщенный график, где представлена опытная кривая суглинка ($W=0,51$ д.е., $\rho=1,78$ г/см³) и кривые, рассчитанные по формулам 3.15-3.17 изображены на рисунке 3.19, а параметры и рассчитанные деформационные характеристики представлены в таблице 3.5. Экспериментально установлено, что коэффициент оттаивания для этого образца равен 0,349 д.е, а коэффициент сжимаемости 0,356 МПа⁻¹. Таким образом, данные рассчитанные по степенной и логарифмической формуле практически не отличаются от экспериментальных.

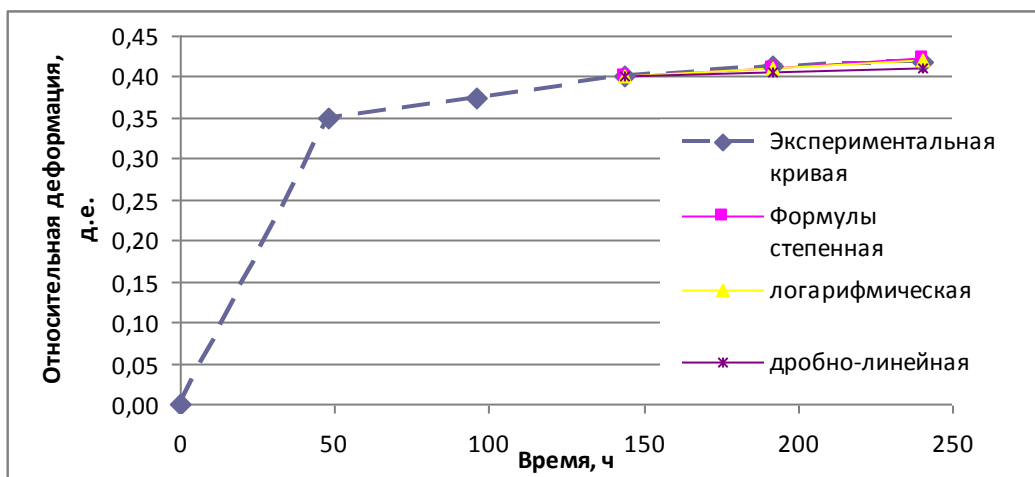


Рисунок 3.19. Зависимость относительной осадки от времени для суглинка ($W=0,51$, $\rho=1,78$ г/см³)

Таким образом, для некоторых образцов, как было показано в данной главе, вполне возможно использовать эти подходы для прогноза деформаций. Но при

этом применимость этих подходов необходимо проверить на образцах нарушенного и ненарушенного сложения для выявления возможности их повсеместного использования.

Таблица 3.5

Параметры формул и расчетные значения деформационных характеристик

Формулы	Параметры		Деформационные характеристики	
			А, д.е.	m, МПа ⁻¹
Степенная (3.15)	B	0,119	0,348	0,364
	Sn	0,220		
Логарифмическая (3.16)	B	0,044	0,349	0,353
	D	0,176		
Дробно-линейная (3.17)	Sn	0,431	0,352	0,301
	T	12,144		

Выводы

Таким образом, разработанная комплексная методика, включающая экспериментальные исследования деформационных характеристик оттаивающих грунтов в условиях одностороннего и всестороннего оттаивания; математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунтов при оттаивании и уплотнении; прогноз деформаций в условиях компрессии с помощью параметрических уравнений, позволила выявить закономерности изменения деформационных характеристик при разных условиях оттаивания, разработать экспресс методы прогноза осадок. Указанная методика исследования оттаивающих грунтов является новой и представляет собой первое защищаемое положение.

Глава 4. Закономерности изменения деформационных характеристик и физических свойств образцов в зависимости от условий оттаивания

4.1. Деформационные характеристики

В результате исследований выявлено, что для всех образцов характерна линейная зависимость условно-стабилизированной осадки уплотнения от напряжения.

Результаты статистической обработки величин деформационных характеристик представлены в таблицах 4.1 -4.2. При этом рассчитывались средние значения (A_n и m_n) и коэффициент вариации (V) каждой деформационной характеристики, полученные при разных условиях оттаивания, а также общее значение коэффициента вариации, полученные при совмещении данных одностороннего и всестороннего оттаивания.

Серии опытов (табл. 4.1 -4.2) отвечали следующим условиям:

- серия 1-2 – массивная криогенная текстура малая влажность (для всех последующих нечетное значение - наибольшая нагрузка на первой ступени (0,2 МПа - песок, 0,1 МПа - суглинок); четное значение - наименьшая нагрузка – 0,025 МПа);
- серия 3-4 – массивная криогенная текстура наибольшая влажность;
- серия 5-6 – слоистая криогенная текстура с одним шлиром;
- серия 7-8 – слоистая криогенная текстура с тремя шлирами.

В результате экспериментальных исследований выявлено, что значения коэффициентов оттаивания при всестороннем оттаивании, в основном, больше или равны коэффициентам оттаивания при одностороннем. Максимальное отличие между ними составляет для песка 16 %, супеси 19 %, суглинка 27 %. При этом коэффициент вариации коэффициента оттаивания для обоих условий оттаивания не превышает 9%. Коэффициент сжимаемости, по данным проведенных испытаний, в основном, больше при одностороннем оттаивании, чем при всестороннем. Максимальная разница между значениями составляет для песка 19 %, супеси 24%, суглинка 33 %.

Таблица 4.1

Результаты статистической обработки опытных величин коэффициента оттаивания (А).

№ серии опытов	Одностороннее оттаивание					Всестороннее оттаивание					Средние значения для обоих условий оттаивания	
	А, д.е.		А _п , д.е.	В, д.е.	А, д.е.		А _п , д.е.	В, д.е.	А _п , д.е.	В, д.е.		
песок												
1	0,065	0,069	0,073	0,069	0,057	0,069	0,072	0,065	0,069	0,05	0,069	0,048
2	0,058	0,054	0,055	0,056	0,04	0,06	0,052	0,055	0,056	0,075	0,056	0,054
3	0,102	0,094	0,101	0,099	0,045	0,104	0,097	0,1	0,101	0,035	0,1	0,037
4	0,081	0,073	0,078	0,077	0,054	0,085	0,077	0,08	0,081	0,052	0,079	0,052
супесь												
1	0,144	0,129	0,136	0,137	0,056	0,144	0,146	0,153	0,148	0,033	0,142	0,059
2	0,115	0,118	0,123	0,119	0,034	0,123	0,122	0,126	0,124	0,017	0,121	0,033
3	0,199	0,192	0,189	0,194	0,026	0,211	0,196	0,206	0,204	0,036	0,199	0,041
4	0,181	0,176	0,167	0,175	0,04	0,196	0,176	0,169	0,18	0,075	0,178	0,057
5	0,175	0,198	0,181	0,184	0,064	0,208	0,196	0,193	0,199	0,04	0,192	0,063
6	0,178	0,166	0,174	0,173	0,036	0,18	0,183	0,175	0,179	0,022	0,176	0,034
7	0,178	0,172	0,188	0,179	0,047	0,194	0,185	0,188	0,189	0,026	0,184	0,044
8	0,169	0,155	0,178	0,167	0,068	0,184	0,178	0,173	0,178	0,029	0,173	0,058
суглинок												
1	0,114	0,132	0,124	0,123	0,073	0,14	0,13	0,127	0,133	0,052	0,128	0,068
2	0,101	0,106	0,096	0,101	0,054	0,096	0,102	0,113	0,104	0,086	0,102	0,066
3	0,217	0,225	0,23	0,224	0,029	0,241	0,231	0,261	0,244	0,062	0,234	0,065
4	0,194	0,209	0,217	0,207	0,055	0,224	0,218	0,195	0,213	0,072	0,21	0,06
5	0,214	0,2	0,186	0,2	0,071	0,235	0,217	0,227	0,226	0,039	0,213	0,084
6	0,178	0,198	0,189	0,189	0,053	0,218	0,205	0,196	0,206	0,054	0,198	0,069
7	0,202	0,191	0,181	0,191	0,054	0,204	0,22	0,23	0,218	0,061	0,205	0,089
8	0,192	0,19	0,179	0,187	0,038	0,199	0,191	0,182	0,19	0,046	0,189	0,039

Результаты статистической обработки опытных величин коэффициента сжимаемости (m).

№ серии опытов	Одностороннее оттаивание					Всестороннее оттаивание					Средние значения для обоих условий оттаивания	
	m , МПа ⁻¹		m_n , МПа ⁻¹	V , д.е.	m , МПа ⁻¹		m_n , МПа ⁻¹	V , д.е.	m_n , МПа ⁻¹	V , д.е.		
песок												
1	0,035	0,03	0,032	0,032	0,072	0,032	0,028	0,032	0,031	0,08	0,031	0,073
2	0,045	0,043	0,054	0,047	0,124	0,045	0,05	0,046	0,047	0,058	0,047	0,086
3	0,04	0,037	0,036	0,038	0,051	0,039	0,032	0,039	0,037	0,106	0,037	0,075
4	0,053	0,05	0,051	0,051	0,032	0,056	0,05	0,051	0,052	0,064	0,051	0,047
супесь												
1	0,087	0,09	0,098	0,091	0,062	0,086	0,082	0,079	0,082	0,042	0,087	0,076
2	0,172	0,181	0,161	0,171	0,058	0,165	0,173	0,153	0,164	0,061	0,168	0,059
3	0,095	0,113	0,098	0,102	0,093	0,09	0,101	0,094	0,095	0,058	0,099	0,079
4	0,21	0,185	0,195	0,197	0,066	0,181	0,189	0,195	0,188	0,04	0,192	0,055
5	0,093	0,091	0,081	0,088	0,074	0,072	0,087	0,081	0,08	0,097	0,084	0,092
6	0,174	0,187	0,166	0,176	0,061	0,174	0,169	0,149	0,164	0,08	0,17	0,074
7	0,089	0,092	0,083	0,088	0,051	0,071	0,085	0,081	0,079	0,093	0,083	0,088
8	0,16	0,186	0,177	0,174	0,076	0,161	0,149	0,177	0,162	0,088	0,168	0,084
суглинок												
1	0,118	0,106	0,108	0,111	0,061	0,079	0,098	0,103	0,093	0,136	0,102	0,128
2	0,212	0,21	0,189	0,204	0,062	0,184	0,197	0,161	0,18	0,102	0,192	0,099
3	0,13	0,124	0,115	0,123	0,061	0,113	0,107	0,101	0,107	0,057	0,115	0,092
4	0,254	0,226	0,254	0,245	0,067	0,228	0,233	0,255	0,239	0,062	0,242	0,059
5	0,108	0,125	0,112	0,115	0,078	0,105	0,098	0,112	0,105	0,065	0,11	0,082
6	0,228	0,233	0,255	0,239	0,062	0,199	0,215	0,206	0,206	0,039	0,223	0,092
7	0,114	0,091	0,105	0,103	0,11	0,107	0,103	0,099	0,103	0,039	0,103	0,074
8	0,188	0,213	0,207	0,203	0,065	0,187	0,194	0,191	0,191	0,018	0,197	0,055

При этом коэффициент вариации коэффициента сжимаемости для обоих условий оттаивания не превышает 13%.

Таким образом, можно сделать вывод, что условия оттаивания влияют на значения коэффициента сжимаемости и оттаивания, но коэффициент вариации деформационных характеристик не превышает 15%, поэтому можно говорить о достаточной однородности выборки данных.

Критерий “правило трех сигм” является одним из простейших для проверки результатов, подчиняющихся нормальному закону распределения. Сущность правила трех сигм: если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения. Это правило следует непосредственно из рассмотрения нормального закона распределения случайных величин [55]. Все полученные значения деформационных характеристик удовлетворяют правилу трех сигм, поэтому можно использовать критерии сравнения математических ожиданий и дисперсий двух методик (одностороннего и всестороннего оттаивания).

При выполнении испытаний по двум разным методикам необходимо сравнить степень разброса (дисперсий) получаемых характеристик. Для сравнения использовался критерий, основанный на распределении Фишера (F-критерий), который равен отношению двух дисперсий (большой к меньшей), вычисленных для значений, полученных при разных условиях оттаивания. Полученное значение сравнивают с табличным, которое для уровня значимости $\alpha=0,05$ и степени свободы равной двум, равно 19 [73]. Рассчитанные значения критерия Фишера для всех грунтов меньше 19, поэтому можно сделать вывод, что дисперсии полученных деформационных характеристик при разных условиях оттаивания равны (таблица 4.3).

Для сравнения двух средних значений использовался t-критерий (распределение Стьюдента) для двух независимых выборок данных при равных дисперсиях [73]. Полученное значение сравнивалось с критическим, которое для уровня значимости $\alpha=0,05$ и четырех степеней свободы равно 2,78. Полученные

значения t-критерия меньше критического значения для всех видов грунтов, что позволяет сделать вывод о возможности использования всестороннего оттаивания при заданных условиях испытаний для определения деформационных характеристик (таблица 4.3).

Таблица 4.3

Значения показателей для сравнения средних значений и дисперсий деформационных характеристик

Название грунта	№ серии опытов	A, д.е.		m, МПа ⁻¹	
		F-критерий	t-критерий	F-критерий	t-критерий
песок	1	1,35	0,14	1,11	1,10
	2	3,51	0,08	4,54	0,02
	3	1,59	0,79	4,15	0,39
	4	1,02	1,31	4,16	0,67
супесь	1	1,48	2,35	2,67	2,63
	2	3,68	2,05	1,01	0,76
	3	2,05	2,26	2,95	0,86
	4	3,65	0,68	3,03	0,79
	5	2,18	1,89	1,42	1,12
	6	2,45	1,65	1,52	1,00
	7	3,04	1,83	2,60	1,48
	8	4,67	1,65	1,15	0,88
суглинок	1	1,74	1,49	3,60	2,24
	2	2,72	0,50	2,14	1,47
	3	5,54	2,33	1,52	2,30
	4	1,84	0,58	1,26	0,39
	5	2,62	2,73	1,73	1,25
	6	1,24	2,17	3,35	2,72
	7	1,63	2,77	8,00	0,10
	8	1,57	0,57	14,36	1,24

Анализ данных показывает, что различное распределения льда в образцах при одинаковой суммарной влажности влияет неодинаково на коэффициент оттаивания и коэффициент сжимаемости.

Для супеси при всестороннем и одностороннем оттаивании наибольшее значение коэффициента оттаивания характерно для образца с массивной криогенной текстурой, а наименьшее для слоистой криогенной текстуры с 3 шлирами. Нормативные значения коэффициента сжимаемости образцов отличаются не более чем на 21 % при нагрузке 0,1 МПа на первой ступени и не

более 16 % при нагрузке 0,025 МПа, а коэффициент оттаивания не более 8% при нагрузке 0,1 МПа и не более 5 % при нагрузке 0,025 МПа. Наибольшее отличие характерно для образцов, испытанных при всестороннем оттаивании. При этом видно, что криогенная текстура в супеси в значительной степени влияет на коэффициент сжимаемости.

Для суглинка наибольшие нормативные значения коэффициента оттаивания также получены для образцов с массивной криогенной текстурой, а наименьшие со слоистой криогенной текстурой с 3 шлирами. При этом нормативные значения коэффициента сжимаемости при нагрузке 0,025 МПа на первой ступени отличается не более чем на 26 %, а коэффициент оттаивания не более 14%, а при нагрузке 0,1 МПа коэффициента сжимаемости - не более 20 %, а коэффициент оттаивания не более 11%. Наибольшие отличия выявлены для образцов, испытанных как при всестороннем, так и одностороннем оттаивании.

Криогенная текстура исследуемых образцов при одинаковой суммарной влажности влияет на деформационные характеристики оттаивающих грунтов: коэффициент оттаивания и сжимаемости уменьшается с увеличением количества шлиров в связи с образованием большого количества макропор, которые полностью не разрушаются и концентрируют влагу. Наибольшее влияние указанного фактора выявлено для суглинка.

Наибольшее отличие в поведении грунтов при всестороннем и одностороннем оттаивании происходит при оттаивании (вторая ступень). Поэтому эта ступень была рассмотрена более внимательно.

Для установления окончания фильтрационной стадии уплотнения оттаивающих грунтов применялся известный приближенный графический метод проф. Тейлора. Согласно этому методу, окончание стадии фильтрационной консолидации определяется построением графиков уплотнений в системе координат: $S - \sqrt{t}$ (S - абсолютная осадка, t - время). Полученные результаты показали, что независимо от скорости и вида оттаивания с момента установления стационарного теплового режима в образце, графики при всех нагрузках для всех трех видов грунтов спрямляются (рисунок 4.1). К моменту полного завершения

оттаивания проявляется нелинейный характер указанных зависимостей, что показывает наступление стадии вторичной консолидации с развитием деформации ползучести.

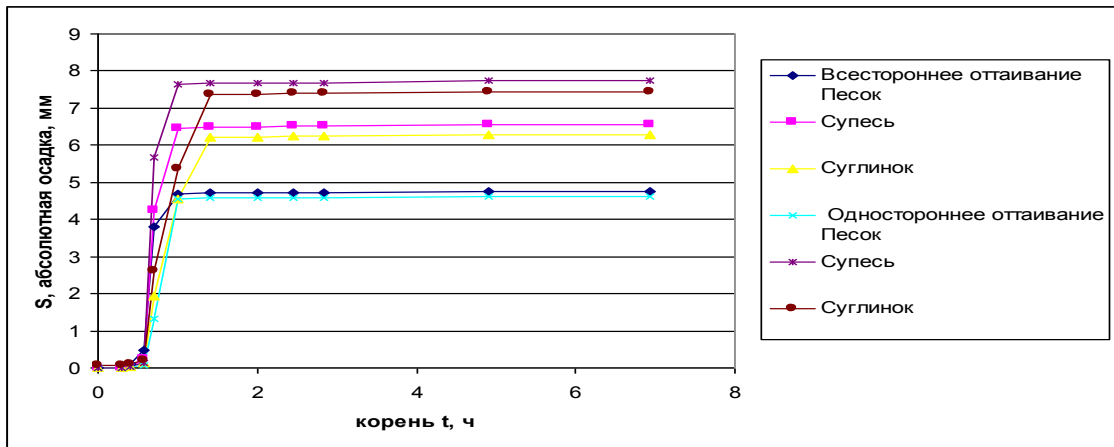


Рисунок 4.1. Зависимость осадки при оттаивании от времени для различных видов грунтов при нагрузке 0,025 МПа (песок ($W=0,25$, $\rho=1,92$ г/см³), супесь ($W=0,28$, $\rho=1,91$ г/см³), суглинок ($W=0,39$, $\rho=1,71$ г/см³))

Данные на рисунке 4.1 показывают, что при всестороннем оттаивании процесс фильтрационной консолидации протекает быстрее, с большей величиной осадки оттаивания. При этом наибольшее отличие во времени окончания и значениях абсолютной деформации после фильтрационной стадии консолидации соответствует суглинку, а наименьшее - песку. Стадия фильтрационной консолидации заканчивается за 30-50 минут при всестороннем оттаивании и 1,5 - 2 ч при одностороннем.

Получено, что основная осадка в условиях компрессии протекает в период оттаивания. Но при этом при разных условиях оттаивания наблюдаются разные отношение осадки оттаивания к полной стабилизированной осадке (осадке уплотнения) (таблица 4.4). Это установлено сопоставлением рассчитанных значений относительной осадки после окончания стадии фильтрационной консолидации и полной стабилизированной осадки (в результате пяти ступеней нагружения) для грунтов различной влажности и криогенного строения.

Так, для песка эти значения примерно одинаковы, для супеси преобладает соотношение, что при всестороннем оттаивании осадка больше, а для суглинка нет четкой корреляции.

Сопоставление осадок оттаивания и уплотнения в условиях всестороннего и одностороннего оттаивания

№ серии	Влажность, д.е.	Плотность, г/см ³	Нагрузка на первой ступени, МПа	Криогенная текстура	Всестороннее оттаивание			Одностороннее оттаивание		
					осадка оттаивания St, д.е.	осадка уплотнения Sp, д.е.	St/Sp	осадка оттаивания St, д.е.	осадка уплотнения Sp, д.е.	St/Sp
Песок										
1	0,18	1,99	0,20	массивная	0,07	0,08	0,86	0,07	0,08	0,87
2	0,18	1,99	0,025	массивная	0,05	0,07	0,82	0,05	0,07	0,85
3	0,25	1,94	0,20	массивная	0,11	0,12	0,89	0,10	0,12	0,89
4	0,25	1,94	0,025	массивная	0,08	0,10	0,83	0,08	0,09	0,83
Супесь										
1	0,18	1,98	0,10	массивная	0,13	0,17	0,77	0,14	0,16	0,88
2	0,18	1,98	0,025	массивная	0,13	0,16	0,79	0,12	0,16	0,77
3	0,28	1,91	0,10	массивная	0,20	0,23	0,88	0,20	0,22	0,90
4	0,28	1,91	0,025	массивная	0,18	0,22	0,81	0,17	0,21	0,80
5	0,28	1,91	0,10	1 шлик 2 мм	0,20	0,22	0,92	0,19	0,21	0,90
6	0,28	1,91	0,025	1 шлик 2 мм	0,19	0,22	0,84	0,17	0,21	0,82
7	0,28	1,91	0,10	3 шлика 0,65 мм	0,20	0,21	0,92	0,19	0,21	0,91
8	0,28	1,91	0,025	3 шлика 0,65 мм	0,18	0,22	0,84	0,17	0,20	0,81
Суглинок										
1	0,30	1,86	0,10	массивная	0,14	0,16	0,86	0,13	0,16	0,85
2	0,30	1,86	0,025	массивная	0,10	0,14	0,69	0,10	0,14	0,70
3	0,40	1,74	0,10	массивная	0,25	0,28	0,88	0,25	0,28	0,90
4	0,40	1,74	0,025	массивная	0,21	0,26	0,81	0,43	0,46	0,93
5	0,40	1,74	0,10	1 шлик 2 мм	0,24	0,27	0,88	0,20	0,23	0,88
6	0,40	1,74	0,025	1 шлик 2 мм	0,20	0,25	0,81	0,18	0,23	0,79
7	0,40	1,74	0,10	3 шлика 0,65 мм	0,23	0,25	0,90	0,21	0,24	0,89
8	0,40	1,74	0,025	3 шлика 0,65 мм	0,19	0,23	0,82	0,19	0,23	0,81

Из таблицы 4.4 видно, что осадка за период оттаивания составляет для песков пылеватых 86-93 % от полной стабилизированной осадки, для супесей 77 - 92 %, а для суглинков 69-90 %.

Кроме этого, было проведено сравнение деформационных характеристик, полученных при испытании грунтовых паст и грунтов ненарушенного сложения.

Для определения коэффициентов оттаивания и сжимаемости было проведено 64 испытания суглинка, 30 супеси, 16 песка пылеватого на образцах мерзлых грунтов ненарушенного сложения природной влажности и льдистости. Результаты статистической обработки экспериментальных данных для каждого генетического типа отложений представлены в таблице 4.5. Коэффициент вариации для деформационных характеристик не превышал 0,4. Для дальнейшей обработки использовались 53 значения деформационных характеристик суглинка, 27 супеси и 16 песка.

Таблица 4.5

Данные статистической обработки результатов испытаний грунтов ненарушенной структуры

Показатели	Влажность W_{tot} , д.е.	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент оттаивания A , д.е.	Коэффициент сжимаемости m , МПа ⁻¹
Максимальное значение	0,63/0,53/0,25*	1,96/1,97/2,05	0,32/0,28/0,11	0,29/0,19/0,05
Минимальное значение	0,28/0,18/0,17	1,52/1,56/1,88	0,05/0,05/0,05	0,06/0,03/0,02
Среднее значение	0,40/0,28/0,21	1,74/1,91/1,95	0,16/0,14/0,08	0,16/0,10/0,03
Среднеквадратическое отклонение	0,13/0,08/0,03	0,11/0,17/0,05	0,07/0,06/0,02	0,07/0,06/0,007
Коэффициент вариации	0,36/0,29/0,14	0,06/0,10/0,02	0,40/0,40/0,23	0,40/0,40/0,21

* – Перед чертой значения для суглинка, за чертой – супеси, за второй чертой – песка.

Зависимости деформационных характеристик оттаивающих грунтов от показателей физических свойств могут аппроксимироваться линейной зависимостью [46]. Графики зависимости деформационных характеристик от влажности для грунтов ненарушенного сложения и паст представлены на рисунках 4.2-4.3. Их анализ показывает, что значения деформационных характеристик грунтовых смесей входят в диапазон изменения свойств грунтов ненарушенного сложения.

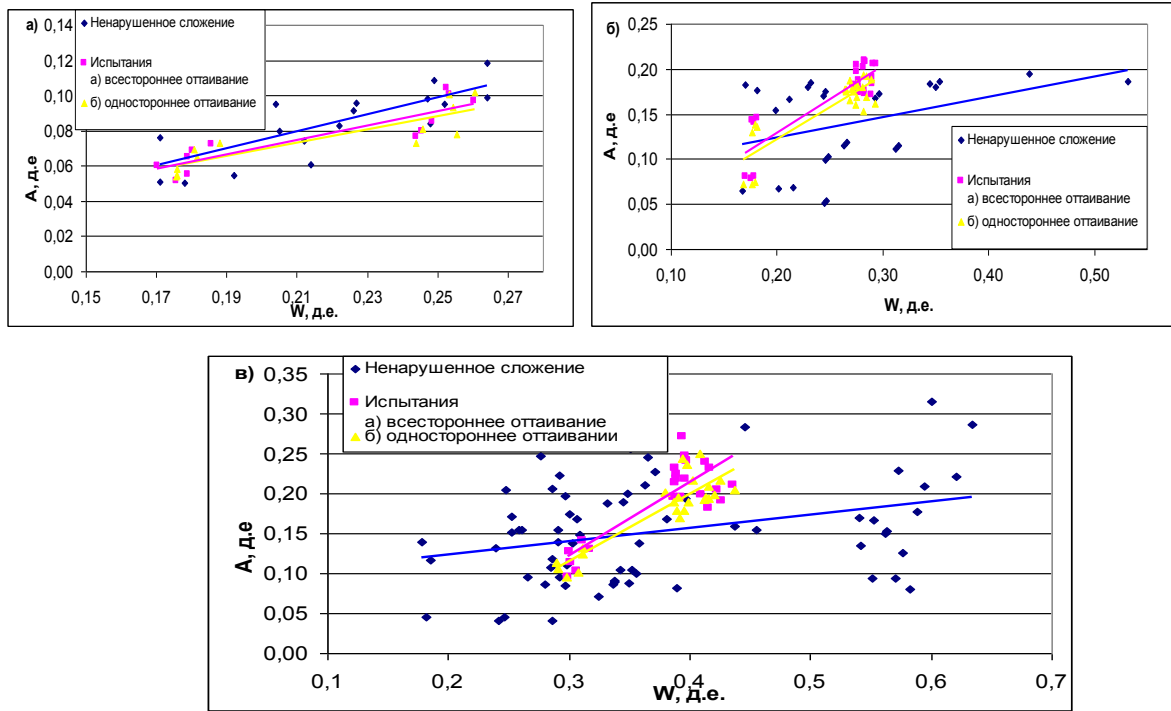


Рисунок 4.2. Зависимости коэффициента оттаивания грунтов ненарушенного сложения и модельных образцов в условиях всестороннего и одностороннего оттаивания от влажности: а) песка; б) супеси; в) суглинка.

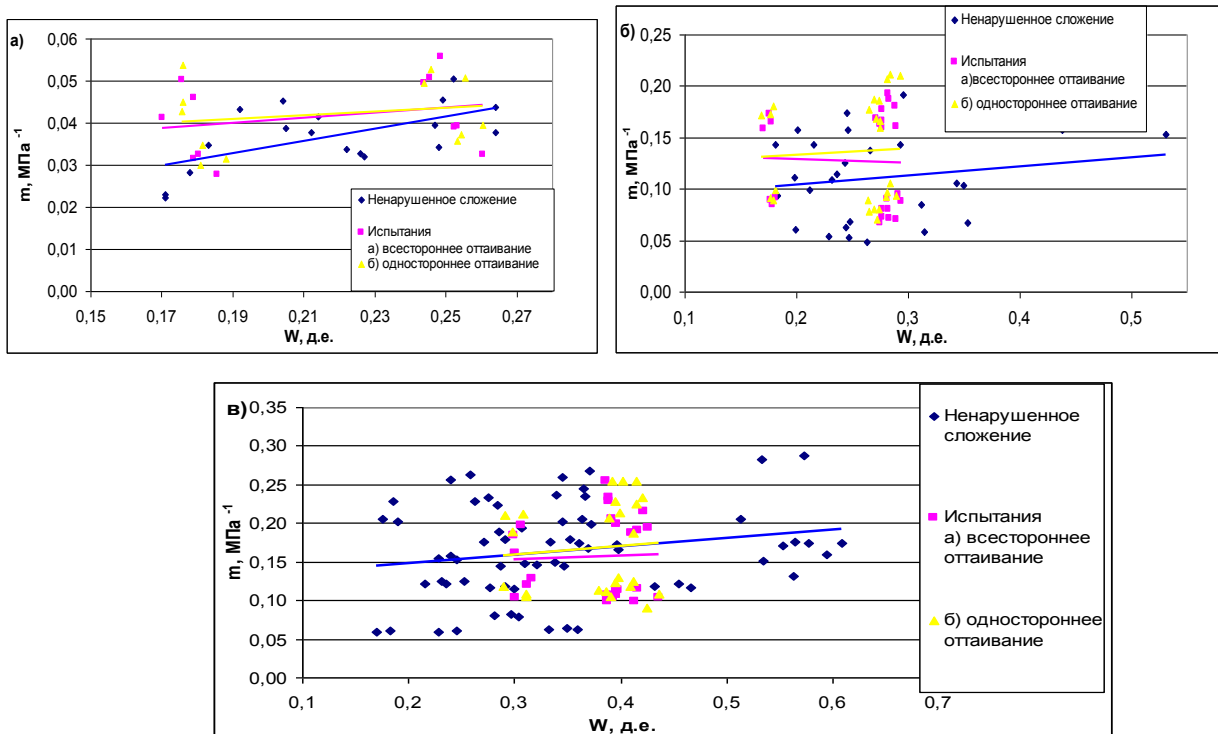


Рисунок 4.3. Зависимости коэффициента сжимаемости грунтов ненарушенного сложения и модельных образцов в условиях всестороннего и одностороннего оттаивания от влажности: а) песка; б) супеси; в) суглинка.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Значения коэффициента оттаивания при всестороннем оттаивании больше, чем при одностороннем. Максимальное отличие между ними составляет для

песка 16 %, супеси 19 %, суглинка 26 %. При этом коэффициент вариации коэффициента оттаивания для обоих условий оттаивания не превышает 9 %.

2. Коэффициент сжимаемости имеет более высокие значения при одностороннем оттаивании по сравнению со всесторонним. Максимальное отличие между значениями составляет для песка 19 %, супеси 24 %, суглинка 33 %. При этом коэффициент вариации коэффициента сжимаемости для обоих условий оттаивания не превышает 13%.
3. Анализ средних значений и дисперсий деформационных характеристик, полученных при разных условиях оттаивания, позволяет сделать вывод о возможности использования обеих методик при заданных условиях испытаний.
4. Полученные данные экспериментальных исследований модельных образцов находятся в диапазоне изменения деформационных характеристик грунтов ненарушенного сложения для всех видов исследованных грунтов.
5. Криогенная текстура исследуемых образцов при одинаковой суммарной влажности влияет на деформационные характеристики оттаивающих грунтов: коэффициент оттаивания и сжимаемости уменьшается с увеличением количества шлиров в связи с образованием большого количества макропор, которые полностью не разрушаются и концентрируют влагу. Наибольшее влияние указанного фактора выявлено для суглинка.
6. При всестороннем оттаивании процесс фильтрационной консолидации протекает быстрее в 2-3 раза, а также больше осадка оттаивания. Причем наибольшее отличие получилось у суглинка, а наименьшее у песка.
7. Осадка за период оттаивания составляет для песков пылеватых 86-93 % от полной стабилизированной осадки, для супесей 77 - 92 %, а для суглинков 69-90 %.

Таким образом, в условиях заданных равнозначных значений начальной влажности условия оттаивания влияют на физическую сторону процесса консолидации. Так, увеличение скорости оттаивания и неравномерное

распределение нагрузки при всестороннем оттаивании приводят к увеличению стабилизированной осадки. Именно это различие поведения грунтов при оттаивании обуславливает отличие в деформационных характеристиках. Полученные данные показали возможность применения всестороннего оттаивания при определении деформационных характеристик в лабораторных условиях при заданных условиях испытаний. Изменение высоты образца, скорости оттаивания, дренажных условий могут повлиять на значения деформационных характеристик. Изучение влияния указанных особенностей необходимо при дальнейшем усовершенствовании методики.

4.2. Плотность и влажность

В соответствии с методикой испытаний были рассчитаны плотность и влажность с учетом испарения влаги образцов после оттаивания и уплотнения и каждой последующей ступени нагружения.

Анализ графиков зависимости влажности и плотности песка на каждой ступени от напряжения при различной нагрузке показывает достаточно близкие значения. При этом общая влажность при уплотнении в течение всего опыта изменялась менее чем на 1 %. Плотность же изменилась после оттаивания на 5%, а после всех ступеней уплотнения всего на 1 % (рисунок 4.4) Таким образом, можно сделать вывод, что условия оттаивания незначительно влияют на плотность и влажность песка.

Для глинистых грунтов характерна более сложная картина. Как было показано в разделе 4.1, наибольшие изменения в свойствах образцов наблюдаются после оттаивания и уплотнения, поэтому получено как изменились значения плотности и влажности после этой ступени и после окончания испытаний относительно первоначальных значений (таблица 4.6).

Наибольшее изменение свойств характерно для грунтов, испытанных при всестороннем оттаивании. При этом изменение влажности после второй ступени и до окончания испытаний не превышает 10%, а плотности 3%. Условия оттаивания оказывают наибольшее влияние на значения влажности, но отличие между ними

не превышают 5 % для суглинка и 2 % для супеси.

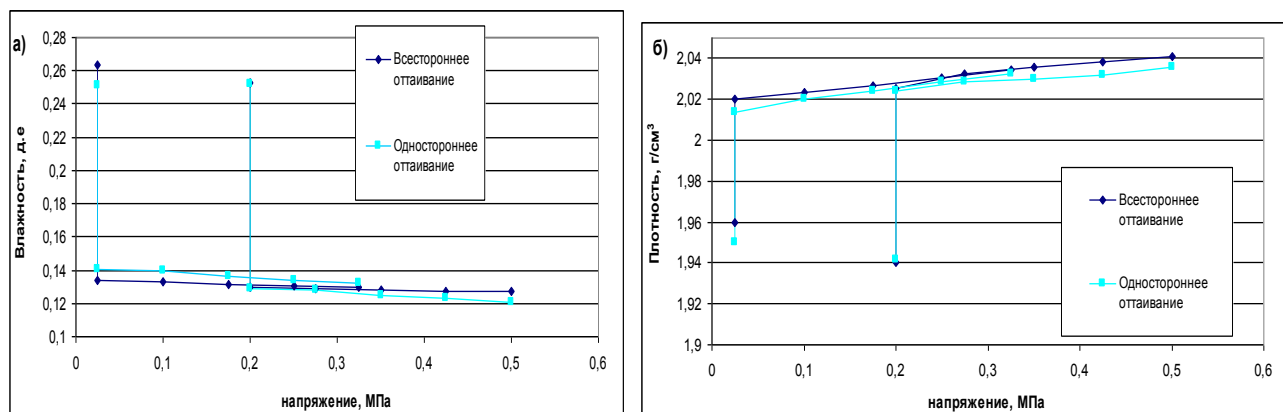


Рисунок 4.4. Зависимости влажности (а) и плотности (б) песка на каждой ступени нагрузки от напряжения

Таблица 4.6

Изменение плотности и влажности грунтов при оттаивании и уплотнении и после испытаний относительно первоначальных значений.

Показатели	Всестороннее оттаивание		Одностороннее оттаивание	
	супесь	суглинок	супесь	суглинок
Изменение влажности после второй ступени, д.е.	0,53-0,63	0,54-0,64	0,55-0,65	0,59-0,68
Изменение влажности после испытания, д.е.	0,51-0,55	0,49-0,55	0,52-0,57	0,51-0,60
Изменение плотности после второй ступени, д.е.	0,87-0,90	0,87-0,90	0,88-0,93	0,88-0,94
Изменение плотности после испытания, д.е.	0,85-0,87	0,85-0,89	0,87-0,91	0,85-0,91

Наибольшие значения влажности после оттаивания (вторая ступень) характерны для образцов супеси и суглинка при одностороннем оттаивании (рисунки 4.5-4.6). При этом отличия между значениями, полученными при разных условиях оттаивания, составляют для супеси несколько десятых процентов и при следующих нагрузках эти различия нивелируются, а для суглинка составляют более 1 %.

При этом для глинистых грунтов влажность после опыта при разных нагрузках больше влажности нижнего предела для суглинка на 0,5-4 %, для супеси 1-1,5 %.

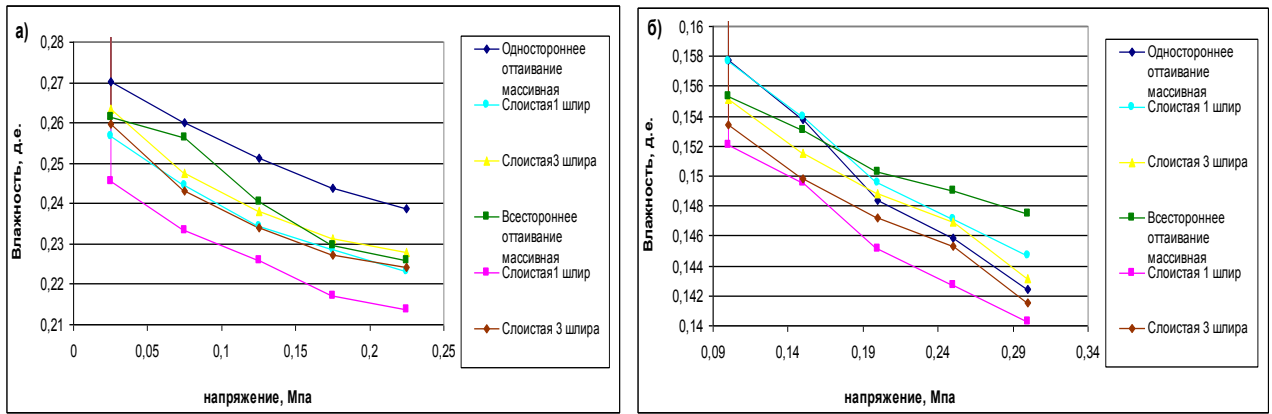


Рисунок 4.5. Зависимости влажности супеси на каждой ступени нагрузки от напряжения при оттаивании: а) $\sigma=0,025$ МПа; б) $\sigma=0,1$ МПа

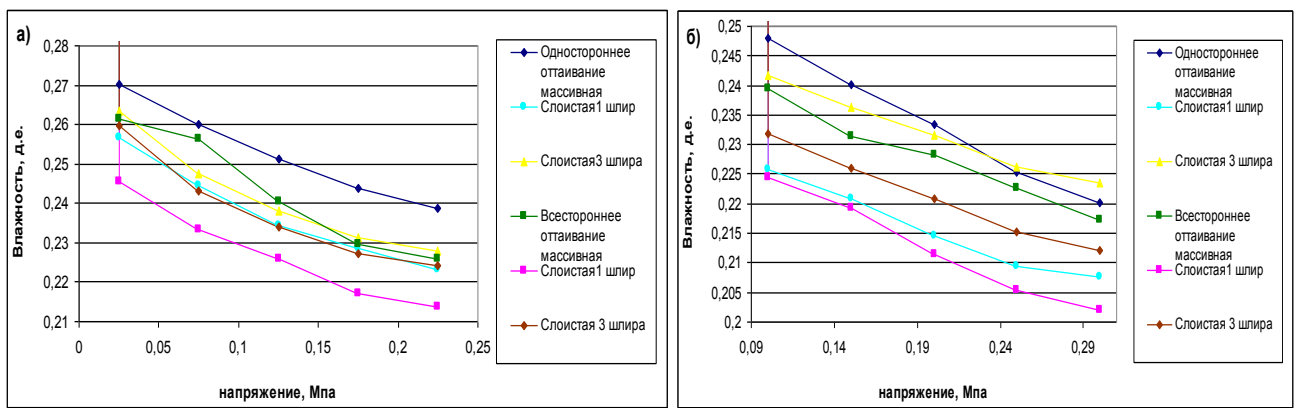


Рисунок 4.6. Зависимости влажности суглинка на каждой ступени нагрузки от напряжения при оттаивании: а) $\sigma=0,025$ МПа; б) $\sigma=0,1$ МПа

Анализ графиков изменения плотности от напряжения на каждой ступени при оттаивании супеси и суглинка показывает, что наибольшие значения плотности характерны для образцов, оттаянных при всестороннем тепловом потоке (рисунки 4.7-4.8). Выявлено, что плотность при одинаковых нагрузках имеет довольно близкие значения, вне зависимости от того при какой нагрузке произошло оттаивание.

Таким образом, в глинистых грунтах условия оттаивания более сильно влияют на изменение влажности в процессе оттаивания и уплотнения, чем в песчаных, и чем выше дисперсность, тем влияние больше.

Кроме суммарной влажности исследовалось распределение влажности внутри образцов. Образцы расчленились на 3 части: центральная часть (диаметр от центра 1,2 см), промежуточная (диаметр 1,2-2,3 см), боковая (диаметр 2,3-3,5 см). Указанные части делились по высоте тоже на три части. Так как наибольшее

изменение свойств характерно для всех образцов после оттаивания при напряжении 0,025 МПа, то изучение распределения влажности было проведено в этих условиях. Результаты приведены в таблице 4.7. Выявлено, что для песка независимо от условий оттаивания характерно примерно равномерное распределение влажности по образцу.

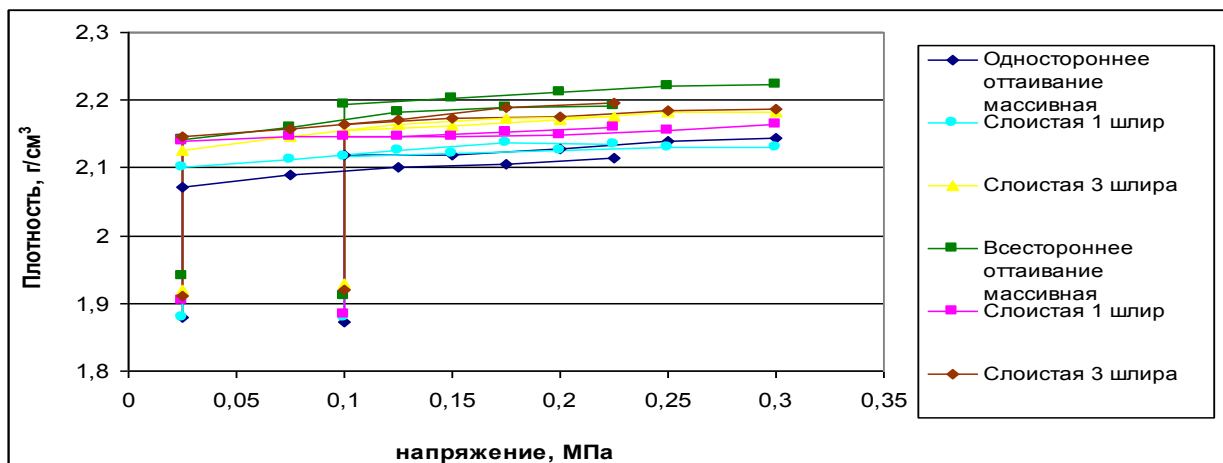


Рисунок 4.7. Зависимость плотности супеси на каждой ступени нагрузки от напряжения

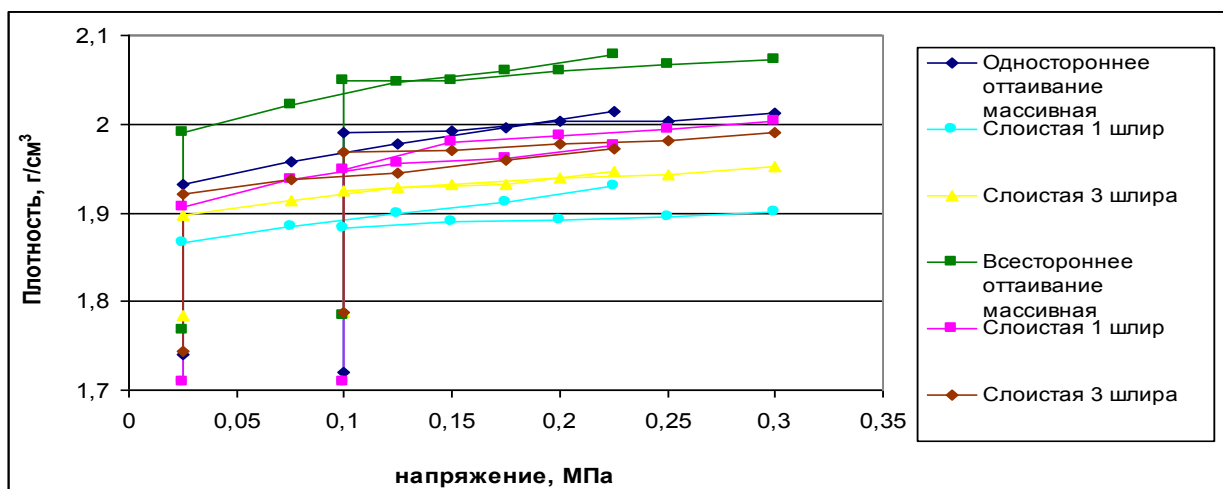


Рисунок 4.8. Зависимость плотности суглинка на каждой ступени нагрузки от напряжения

В глинистых образцах при одностороннем оттаивании также наблюдается достаточно равномерное распределение влажности, а при всестороннем отмечается понижение влажности в центре образца и ее повышение к боковой поверхности, что связано с неравномерностью распределения нагрузки при оттаивании. Это наиболее выражено в суглинке.

Распределение влажности в образцах грунта после оттаивания

Вид грунта	Криогенная текстура	По высоте	Одностороннее оттаивание			Всестороннее оттаивание			
			Радиус образцов от центра, см			Радиус образцов от центра, см			
			3,5-2,3	2,3-1,2	1,2-0	3,5-2,3	2,3-1,2	1,2-0	
песок	Массивная	верхняя часть	0,136	0,130	0,132	0,135	0,125	0,128	
		середина	0,137	0,134	0,129	0,134	0,131	0,124	
		нижняя часть	0,137	0,126	0,122	0,132	0,125	0,123	
супесь	Массивная	верхняя часть	0,187	0,170	0,169	0,191	0,170	0,164	
		середина	0,189	0,166	0,176	0,194	0,172	0,170	
		нижняя часть	0,182	0,173	0,177	0,181	0,169	0,171	
	Слоистая 1 шлир	верхняя часть	0,166	0,155	0,156	0,162	0,154	0,156	
		середина	0,178	0,168	0,160	0,176	0,164	0,162	
		нижняя часть	0,176	0,162	0,153	0,174	0,161	0,152	
	Слоистая 3 шлира	верхняя часть	0,174	0,164	0,163	0,174	0,163	0,154	
		середина	0,178	0,173	0,168	0,183	0,173	0,169	
		нижняя часть	0,179	0,170	0,161	0,181	0,169	0,159	
	суглинок	Массивная	верхняя часть	0,284	0,278	0,277	0,281	0,261	0,266
			середина	0,280	0,271	0,278	0,287	0,267	0,258
			нижняя часть	0,289	0,279	0,270	0,291	0,270	0,261
Слоистая 1 шлир		верхняя часть	0,252	0,245	0,246	0,267	0,243	0,241	
		середина	0,264	0,272	0,268	0,268	0,254	0,244	
		нижняя часть	0,266	0,265	0,253	0,265	0,255	0,254	
Слоистая 3 шлира		верхняя часть	0,256	0,264	0,263	0,263	0,243	0,236	
		середина	0,264	0,263	0,261	0,272	0,259	0,248	
		нижняя часть	0,265	0,269	0,251	0,268	0,246	0,251	

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Условия оттаивания незначительно влияют на плотность и влажность песка, а также распределение влажности внутри образцов.

2. Наибольшие значения влажности после оттаивания (вторая степень) характерны для образцов супеси и суглинка при одностороннем оттаивании.

3. Наибольшие значения плотности супеси и суглинка характерны для условий всестороннего оттаивания. Выявлено, что плотность при одинаковых нагрузках имеет довольно близкие значения, вне зависимости от того при какой нагрузке произошло оттаивание.

4. В глинистых образцах при одностороннем оттаивании наблюдается достаточно равномерное распределение влажности, а при всестороннем отмечается понижение влажности в центре образца и ее повышение к боковой поверхности. Это наиболее выражено в суглинке.

5. Значение влажности после окончания испытаний выше влажности нижнего предела пластичности в супеси на 1-1,5 %, а в суглинке 0,5-4 %.

Таким образом, выявлено, что условия оттаивания влияют в большей степени на плотность и влажность глинистых грунтов, чем песчаных.

4.3. Коэффициент вязкости

Проявление реологических свойств грунтов, таких как ползучесть, релаксация напряжений, снижение прочности во времени тесно связано с вязкостью.

Так, обобщением опытных данных, выполненных Н.Н. Масловым [52], осредненные значения коэффициента динамической вязкости талой глины изменяются в зависимости от консистенции от 10^{10} до 10^{17} П. Вязкость льда в зависимости от температуры, величины нагрузки, его структуры по данным К.Ф. Войтковского [10] изменяется от 10^{10} - 10^{15} П. Экспериментальные значения коэффициентов вязкости мерзлых грунтов при длительном деформировании изменяются 10^{11} - 10^{13} П [68].

При этом практически нет данных об изменении коэффициента вязкости оттаивающих грунтов. Нами разработана методика по определению

реологических кривых мерзлых и оттаявших грунтов шариковым штампом [69]. При этом стоит отметить, что условия оттаивания практически не влияют на значение вязкости. В результате испытаний грунтов шариковым штампом было определено длительное эквивалентное сцепление и коэффициент вязкости образцов в мерзлом состоянии и после оттаивания под нагрузкой 0,025 МПа (рисунок 4.9).

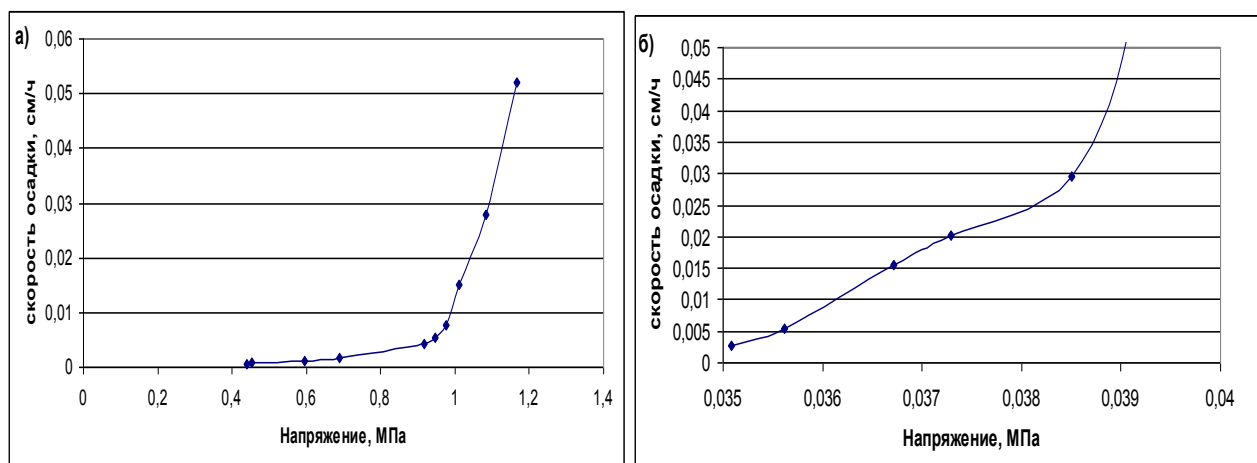


Рисунок 4.9 Пример реологических кривых супеси по данным вдавливания шарикового штампа а) мерзлое состояние ($\rho=1,91 \text{ г/см}^3$, $W_{\text{tot}}=0,28$, $\theta=-2^\circ\text{C}$ б) после оттаивания при нагрузке 0,025 МПа ($\rho=2,11 \text{ г/см}^3$, $W_{\text{tot}}=0,16$)

При меньшей нагрузке было получено наименьшее значение коэффициента вязкости и наибольшее отличие от значений, полученных при испытании мерзлых грунтов (таблица 4.8).

Таблица 4.8

Изменение коэффициента вязкости и длительного эквивалентного сцепления после оттаивания и уплотнения

Показатели	Вид грунта			
	супесь		суглинок	
Влажность, д.е.	0,18	0,27	0,29	0,4
Плотность, г/см^3	1,98	1,9	1,85	1,74
Состояние	мерзлое			
Длительное эквивалентное сцепление, МПа	0,079	0,084	0,069	0,072
Коэффициент вязкость, $1 \cdot 10^9 \text{ П}$	8,23	8,76	5,36	5,99

Продолжение таблицы 4.8				
Состояние	оттаявшее			
Нагрузка при оттаивании	0,025			
Длительное эквивалентное сцепление, МПа	0,0064	0,0062	0,0062	0,0061
Коэффициент вязкость, $1 \cdot 10^7 \Pi$	4,78	4,42	3,34 ⁷	3,02

Выводы

Экспериментальными исследованиями модельных образцов выявлено влияние условий оттаивания на деформационные характеристики, которое заключается в следующем.

1. Значения коэффициента оттаивания, полученные при всестороннем оттаивании больше, чем при одностороннем. Для исследуемых образцов установлено максимальное отличие между коэффициентами оттаивания, которое для песка не превышает 16 %, супеси 19 %, суглинка 26 %.
2. Коэффициент сжимаемости имеет более высокие значения при одностороннем оттаивании по сравнению со всесторонним. Максимальное отличие между значениями составляет для песка 19 %, супеси 24 %, суглинка 33 %.
3. Анализ средних значений и дисперсий деформационных характеристик, полученных при разных условиях оттаивания, позволяет сделать вывод о возможности использования обеих методик.
4. Условия оттаивания незначительно влияют на плотность и влажность песка, а также распределение влажности внутри образцов, в отличие от глинистых грунтов.
5. В условиях всестороннего оттаивания отмечается понижение влажности в центре глинистых образцов и ее повышение к боковой поверхности, что связано с неравномерностью распределения нагрузки при оттаивании.

В результате получены закономерности изменения деформационных характеристик при разных условиях оттаивания в зависимости от вида грунта, влажности, начальной нагрузки, криогенной структуры, что позволило сформулировать второе защищаемое положение.

Глава 5. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния оттаивающих грунтов методом математического моделирования

Примеры схем при решении тепловой задачи определения времени оттаивания для всестороннего и одностороннего оттаивания приведены на рисунке 5.1.

Сравнения результатов расчетов времени оттаивания представлены в таблице 5.1. Как можно видеть, всестороннее оттаивание происходит в 2,5-3 раза быстрее, чем одностороннее.

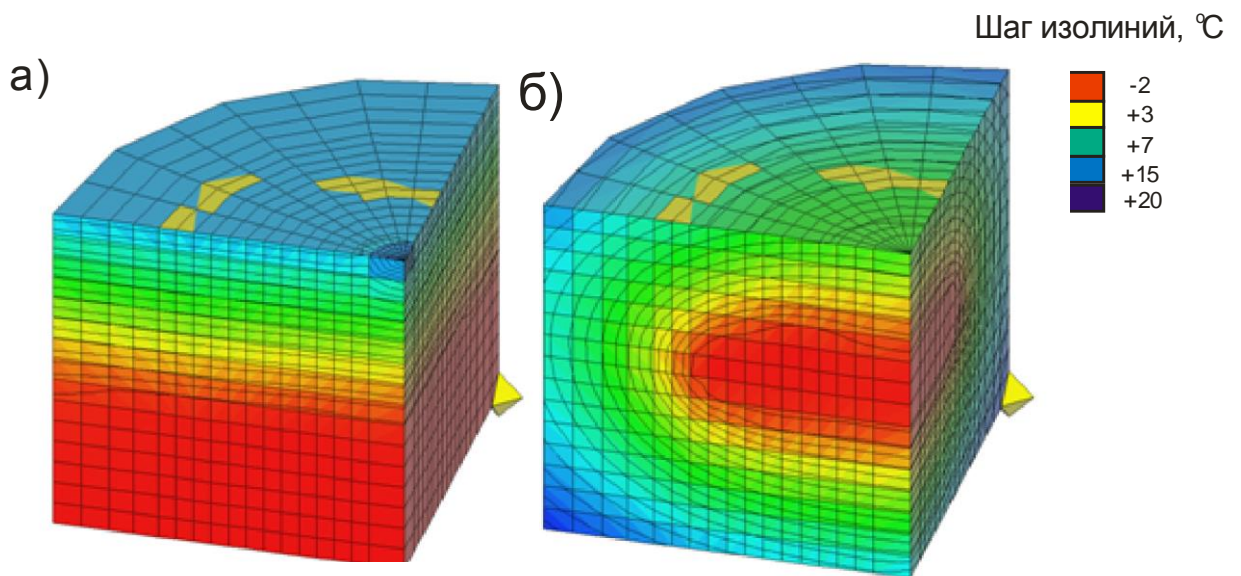


Рис. 5.1. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи: а) одностороннего; б) всестороннего оттаивания

Таблица 5.1

Сравнение времени оттаивания образцов при разных условиях оттаивания

Вид грунта	W_{tot} , д.е.	Время окончания оттаивания, определенные по программе «Termoground», мин	
		Одностороннее оттаивание	Всестороннее оттаивание
Супесь	0,18	39	14
	0,28	62	22
Суглинок	0,3	58	24
	0,4	82	35

При этом стоит учитывать, что температура в камере не сразу достигает

20°C, что не учитывается в расчетах по программе. В расчетах мы задавали мгновенное повышение температуры, поэтому время оттаивания может быть несколько больше. Кроме этого, мы не учитывали изменение теплофизических свойств грунтов под действием нагрузки [45]. При воздействии нагрузки изменяется плотность, а следовательно, и теплопроводность грунта, также в процессе оттаивания происходит уплотнение талого грунта за счет оттока воды. Таким образом, программой «Termoground» получена максимальная скорость оттаивания грунта при температуре +20°C без учета изменения свойств грунта в процессе оттаивания.

В результате решения механической задачи сравнивались значения осадок по данным экспериментальных исследований и расчетов, выполненных по формуле М.Ф. Киселева. Из таблицы 5.2 видно, что осадки при оттаивании, рассчитанные по формуле М.Ф. Киселева, отличаются при разных условиях оттаивания.

Таблица 5.2

Сравнение данных осадок по экспериментальным и расчетным данным.

Вид грунта	W_{tot} , д.е.	Осадки после оттаивания (см), определенные по			
		программе «Termoground»		экспериментальным данным	
		одностор. оттаивание	всесторон. оттаивание	одностор. оттаивание	всесторон. оттаивание
Супесь	0,18	0,097	0,098	0,36	0,40
	0,28	0,374	0,400	0,58	0,63
Суглинок	0,3	0,270	0,293	0,45	0,53
	0,4	0,504	0,590	0,80	0,88

По результатам расчета при всестороннем оттаивании осадки на 5-20% больше, чем при одностороннем. Наибольшая разница характерна для суглинка, а для супеси при влажности 18% условия оттаивания практически не влияют на значения осадок. Данные расчета подтверждают результаты экспериментальных исследований, описанных в разделе 4.1. Это связано с неравномерностью распределения напряжения в грунте в процессе оттаивания, от которого зависит

параметр K_d в уравнении М.Ф. Киселева. Так, при всестороннем оттаивании грунта мерзлое ядро является концентратором напряжения, так как напряжения вокруг ядра превышает напряжение у стенок в 3 раза, что приводит к большему уплотнению образца в центре, а также перераспределению влажности. Так в центре влажность меньше, чем по бокам, что и было зафиксировано экспериментально и описано в главе 4.2. Таким образом, численно подтверждено, что условия оттаивания влияют на осадку грунта при оттаивании.

При этом из таблицы 5.2 можно увидеть, что экспериментальные значения в 1,5-4 раза выше, чем расчетные. Это связано с тем, что формула была выведена на основе экспериментальных данных. Кроме этого, не учитываются в формуле различные физико-механические процессы, протекающие при оттаивании. Но при этом полученные значения позволяют оценить закономерности изменения деформационных характеристик при разных условиях оттаивания и видах испытаний. Поэтому по программе «Termoground» рассчитывались деформационные характеристики для условий уплотнения напряжениями 0,1 МПа и 0,3 МПа (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Расчетные значения деформационных характеристик

Вид грунта	W_{tot} , д.е.	Условия оттаивания	Относительная деформация при напряжениях		Деформационные характеристики	
			0,1 МПа	0,3 МПа	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
Супесь	0,18	одност.	0,028	0,043	0,020	0,076
	0,18	всест.	0,028	0,043	0,020	0,076
	0,28	одност.	0,107	0,159	0,081	0,260
	0,28	всест.	0,114	0,171	0,086	0,286
Суглинок	0,3	одност.	0,077	0,100	0,066	0,114
	0,3	всест.	0,084	0,109	0,071	0,124
	0,4	одност.	0,144	0,202	0,115	0,290
	0,4	всест.	0,169	0,231	0,137	0,311

Анализ данных показал, что для супеси расчетные деформационные

характеристики не входят в диапазон значений, характерных для исследуемого района (таблица 4.5). Так, при влажности 0,18 д.е. коэффициент оттаивания практически в 2 раза меньше значения, характерного для района, а коэффициент сжимаемости входит в этот диапазон. При влажности 0,28 д.е. коэффициент оттаивания удовлетворяет экспериментальным данным, а коэффициент сжимаемости имеет завышенное значение.

Для суглинка с влажностью 0,4 д.е. и 0,3 д.е. расчетные показатели деформационных характеристик входят в диапазон значений экспериментально определенных, характерных для данного генетического типа. При этом стоит отметить, что наибольшее приближение к экспериментальным данным характерно результатам, полученным при одностороннем оттаивании.

На разницу в расчетных и экспериментальных данных осадок может также влиять тот факт, что осадки, полученные при мгновенном нагружении больше, чем при ступенчатом. В программе это никак не учитывается.

Для проверки модели полевых испытаний была рассчитана задача осадки штампа по данным Пахомовой Г.М. [58]. В результате полевых исследований суглинка выявлено, что при оттаивании под нагрузкой 0,24 МПа осадка равна 12 см при времени оттаивания 120 ч. В результате моделирования время оттаивания 116 ч, а осадка составила 5,9 см.

В результате полевых исследований супеси выявлено, что при оттаивании под нагрузкой 0,2 МПа супесь дает осадку 5,5 см при времени оттаивания 60 ч. В результате моделирования было получено время оттаивания 55 ч, а осадка составила 2 см.

Похожие данные были получены при моделировании полевых опытов, выполненных Ушкаловым В.П. [75]. Время оттаивания примерно совпадало, а осадка была в 2-2,5 раза меньше. Различие в осадках может быть связано с не учетом в формуле криогенного строения.

Таким образом, в результате математического моделирования полевых испытаний также не получается точно вычислить осадку, но при этом можно оценить как изменяются деформационные характеристики при разных видах

испытаний.

В программе «Termoground» были рассчитаны осадки при напряжениях 0,1 и 0,3 МПа и по ним рассчитаны деформационные характеристики оттаивающих грунтов. Далее было произведено сравнение деформационных характеристик, полученных по данным моделирования лабораторных компрессионных и полевых испытаний (таблица 5.4). При этом как в компрессионных условиях, так и в полевых рассматривалось только одностороннее оттаивание.

Таблица 5.4

Деформационные характеристики, рассчитанные по программе «Termoground» для условий компрессионных и полевых испытаний

Вид грунта	W _{tot} , д.е.	Деформационные характеристики, рассчитанные для условий испытаний			
		лабораторных		полевых	
		A, д.е.	m, МПа ⁻¹	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
Супесь	0,18	0,020	0,076	0,018	0,075
	0,28	0,081	0,26	0,048	0,150
Суглинок	0,3	0,066	0,114	0,063	0,075
	0,4	0,115	0,29	0,091	0,213

Из таблицы видно, что коэффициент оттаивания получился больше при компрессионных испытаниях и чем больше влажность, тем больше разница в значениях. Коэффициенты сжимаемости в супеси с влажностью 0,18 примерно одинаковы, а в других случаях в компрессионных условиях получились значения больше на 30-50%.

Таким образом, можно сделать вывод, что разное распределение напряжений при оттаивании при компрессионных и штамповых испытаниях при прочих равных условиях приводит к увеличению коэффициента оттаивания и сжимаемости по данным лабораторных испытаний.

5.1. Сравнение деформационных характеристик, полученных в лабораторных и полевых условиях

Накоплено незначительное количество данных, позволяющих сравнивать значения деформационных характеристик, полученных в компрессионных и полевых условиях. Представляется важным провести сравнение выявленной

закономерности математического моделирования и экспериментальных данных. При этом стоит отметить, что имеющиеся данные были получены в полевых условиях при различных условиях проведения испытаний. Так, в работах В.П. Ушкалова (1962), П.Д. Бондарева (1958), Г.В. Порхаева (1958) испытания проводились до предельного значения глубины оттаивания, а в работах Г.И. Пахомовой (1980), В.В. Докучаева (1981), В.А. Сорокина (1989), Ю.Г. Федосеева (1981), В.Д. Пономарева (1990), А.А. Колесова (1990), А.И. Золотаря (1990) при оттаивании на $\frac{1}{2}$ диаметра штампа с обогревающим кольцом равным $\frac{1}{3}$ диаметра штампа.

Результаты сравнительного анализа полевых испытаний и лабораторных (с диаметром прибора 20 см), выполненных В.П. Ушкаловым [75], показывают, что значения коэффициентов оттаивания в лабораторных опытах превышают значения по данным полевых испытаний на 10-45%, коэффициентов сжимаемости - 10-30%.

В работах П.Д. Бондарева [7] и Г.В. Порхаева [61] отмечается возможность введения поправочных коэффициентов для коэффициентов сжимаемости, полученных в компрессионных условиях, которые могут колебаться от 0,3 до 0,8. Г.В. Бондарев в своей работе приводит данные, показывающие, что для суглинков коэффициент сжимаемости в лабораторных условиях был превышен 1,4-3 раза.

В работе Докучаева В.В. [24] указано, что лабораторные значения коэффициента сжимаемости песка завышены примерно на порядок, при этом коэффициент оттаивания искажается в большей мере, чем сжимаемости.

Г.И. Пахомова [58, 68] указывает, что с увеличением глубины оттаивания значения коэффициентов оттаивания и сжимаемости уменьшаются, так как с увеличением мощности слоя сжимающее напряжение под штампом уменьшается. Увеличение глубины оттаивания в полевых опытах приводит к нарушению компрессионных условий, поэтому наиболее оптимальной глубиной является $\frac{1}{2}$ диаметра штампа. При этом значения коэффициентов сжимаемости льдонасыщенных тугопластичных суглинков (район Усть-Илима) при полевых и лабораторных испытаниях имели довольно близкие значения.

В.А. Сорокиным [71] указывается отсутствие корреляции между коэффициентами оттаивания компрессионных и штамповых испытаниях, что объясняется различным содержанием ледяных включений в образцах.

Ю.Г. Федосеев [77] отмечает, что различия в деформировании грунтов в компрессионных и полевых условиях связаны с различным характером разрушения макропор грунта. Так как массив грунта содержит большее количество ледяных включений, поэтому и деформирование будет значительно отличаться.

В.Д. Пономарев [60] отмечает, что лабораторные испытания дают завышенные значения коэффициентов оттаивания и сжимаемости песчаных и глинистых грунтов, причем эти значения могут отличаться на порядок. При этом он отмечает, что температура оттаивания, размер зоны оттаивания оказывают существенное влияние на деформационные характеристики при штамповых испытаниях.

По данным А.А. Колесов [43] значения коэффициентов оттаивания песка, полученных по данным лабораторных определений, существенно больше, чем при испытаниях горячими штампами, а значения коэффициентов сжимаемости близки друг к другу, причем по результатам испытаний горячими штампами несколько выше. Коэффициент пересчета коэффициентов оттаивания от лабораторных к штамповым испытаниям равен 0,14.

По данным А.И. Золотаря [36] отношение значений коэффициентов оттаивания компрессионных испытаний к штамповым в районе Нового Уренгоя равно 20, а сжимаемости - 2,4.

Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициенты сжимаемости, полученные в лабораторных условиях, могут быть как немного меньше, так и больше, но не более чем в 2 раза по сравнению с полевыми. При этом были получены данные, что эти значения совпадают, особенно часто это наблюдается в песчаных грунтах. Коэффициент оттаивания, полученный в лабораторных условиях, в основном больше в 2-20 раз. Выполненный анализ сравнения значений деформационных характеристик, полученных при компрессионных и

штамповых испытаниях, вполне подтверждают данные математического моделирования.

Выводы

Результаты математического моделирования позволили выявить следующие закономерности.

1. Условия оттаивания влияют на значения осадок, что связано с неравномерностью распределения напряжения в грунте в процессе оттаивания. Так при всестороннем оттаивании грунта мерзлое ядро является концентратором напряжения, что приводит к большему уплотнению образца в центре, а также перераспределению влажности.

2. Распределение напряжений при оттаивании в компрессионных и штамповых испытаниях при прочих равных условиях приводит к увеличению коэффициента оттаивания и сжимаемости по данным лабораторных испытаний. Анализ литературных данных подтверждает данные математического моделирования.

Таким образом, одним из важных факторов, значительно влияющих на значение деформационных характеристик, помимо криогенного строения, влажности, льдистости, условий оттаивания, является перераспределение напряжений, возникающее в грунте в процессе испытаний.

Расчетные модельные исследования позволили получить качественные закономерности изменения деформационных характеристик при разных условиях оттаивания в зависимости от вида грунта, начальной влажности, вида испытания (лабораторного - в компрессионных условиях и полевого - горячим штампом), которые представляют второе защищаемое положение.

Глава 6. Расчетные методы прогноза деформаций оттаивающих грунтов и предложения по экспресс методике их определения.

6.1. Прогноз деформационных характеристик на основе параметрических уравнений

Для всех опытов с грунтами нарушенного сложения использован **первый подход** для прогноза деформаций, когда брались результаты первых трех ступеней по экспериментальным данным, а последние две рассчитывались по параметрическим уравнениям. Также рассчитаны деформационные характеристики только по трем ступеням нагружения. Необходимым условием применения уравнений является уменьшение общей деформации на каждой ступени.

С использованием первого подхода были обработаны данные компрессионных испытаний грунтов нарушенного сложения при различных условиях оттаивания и криогенной текстуре. После этого была рассчитана относительная погрешность определения деформационных характеристик при использовании данного подхода для всех видов грунтов (рисунок 6.1). Относительная погрешность рассчитывалась как отношение разности экспериментальной характеристики и расчетной к экспериментальной.

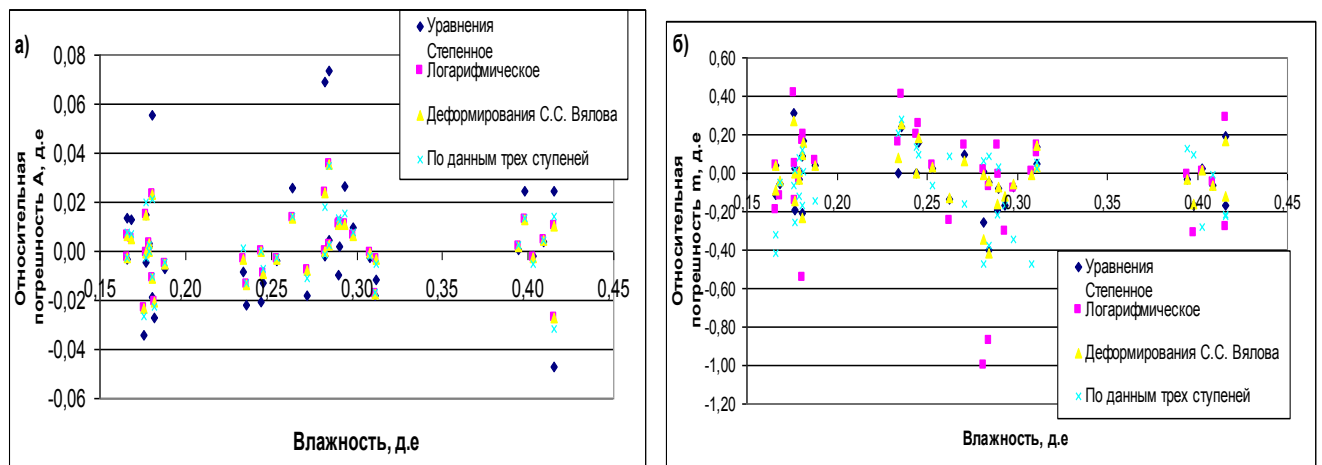


Рисунок 6.1. Зависимости относительной погрешности определения коэффициентов: а) оттаивания; б) сжимаемости от влажности грунтов нарушенного сложения

Получено, что относительная погрешность определения коэффициента

оттаивания всех грунтов вне зависимости от использованного уравнения не превышает 8%, а значения коэффициента сжимаемости могут отличаться практически в 2 раза, особенно при использовании логарифмической формулы и данных, полученных только по трем ступеням, поэтому в дальнейшем результаты расчетов по этим данным не рассматривались.

Выявлено, что при использовании уравнения (3.14) относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости вне зависимости от вида грунта не превышает 25%. В уравнении (3.14) меньше параметров, что делает эту формулу более простой для расчетов, поэтому она использовалась для проверки возможности сокращения числа ступеней нагружения для грунтов ненарушенного сложения, отобранных в Таз-Енисейской области.

Проведенные исследования показали, что из 96 опытов 54 испытания удовлетворяют необходимым условиям применения уравнения (3.14) – параллельность изохронных кривых в логарифмических координатах и уменьшение общей деформации на каждой ступени (10 опытов с песком, 16 - с супесью, 28 - с суглинком).

После обработки всех опытов было получено, что расчетные значения коэффициента оттаивания вне зависимости от вида грунта практически не отличались от экспериментальных (относительная погрешность меньше 8 %). При этом значения коэффициента сжимаемости отличались значительно, некоторые в 2 раза (рисунок 6.2). Как видно из рисунков, при расчете с помощью формул были получены заниженные значения коэффициентов сжимаемости для каждого вида грунта. В среднем разница между экспериментальными и расчетными значениями составляет 25-30 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование первого подхода практически невозможно. Так, для грунтов нарушенного сложения из-за их достаточно однородного строения и как следствие равномерного деформирования этот подход с использованием уравнения (3.14) дал погрешность, не превышающую 25%. Но для прогноза деформаций грунтов ненарушенного сложения Таз-Енисейской области использование этого уравнения имеет

ограниченное применение. Это связано с различным характером деформирования грунтов, имеющих в мерзлом состоянии различные криогенные текстуры и строение. Так, при влажности глинистых грунтов выше 35% только для 46% опытов возможно выполнение прогноза.

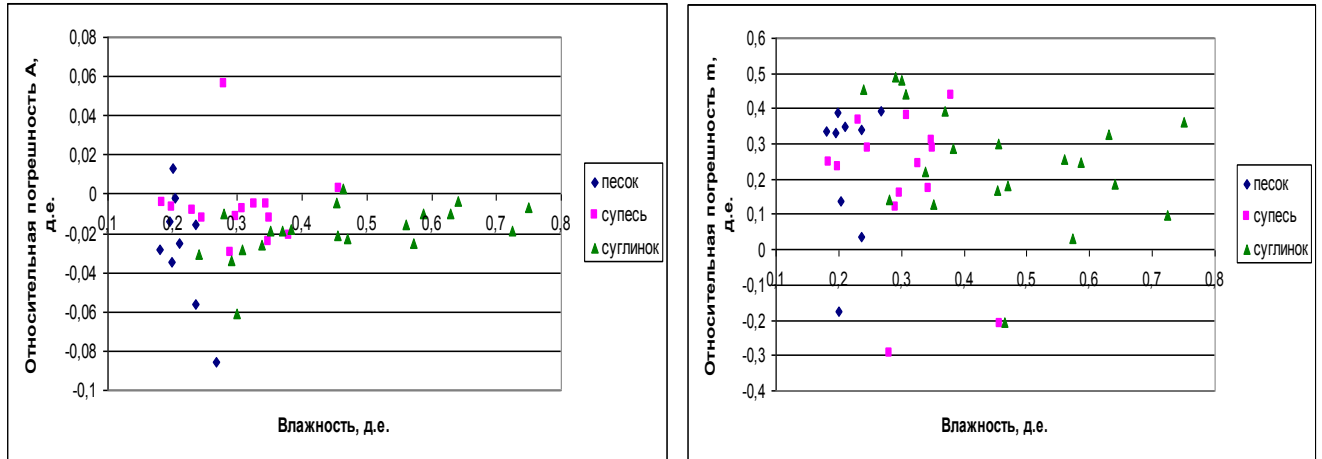


Рисунок 6.2. Зависимости относительной погрешности определения коэффициентов: а) оттаивания; б) сжимаемости от влажности грунтов ненарушенного сложения Таз-Енисейской области

Второй подход для прогноза деформаций применен сразу для грунтов ненарушенного сложения Таз Енисейской области (96 опытов), так как при использовании первого подхода именно для этих образцов получились наибольшие отклонения.

Выявлено, что относительная погрешность определения коэффициента оттаивания для всех исследованных видов грунтов при использовании указанных формул не более 6 %. Значения коэффициента сжимаемости отличаются гораздо больше. Так, для всех видов грунтов наименьшая относительная погрешность расчета коэффициента сжимаемости (менее 25%) выявлена при использовании дробно-линейной формулы (рисунок 6.3). Наибольшие значения относительной погрешности при использовании этой формулы зафиксированы у суглинка.

Метод аппроксимации применим для всех грунтов, для которых выполняется условие уменьшения деформаций с увеличением нагрузки. Поэтому применение этого подхода исследовано на 431 образце ненарушенного сложения.

Для изученных грунтов была вычислена относительная погрешность определения деформационных характеристик с использованием данных только

трех ступеней нагружения, а также с расчетом деформаций на четвертой и пятой ступени по степенной, логарифмической и дробно-линейной функции (рисунки 6.4-6.5).

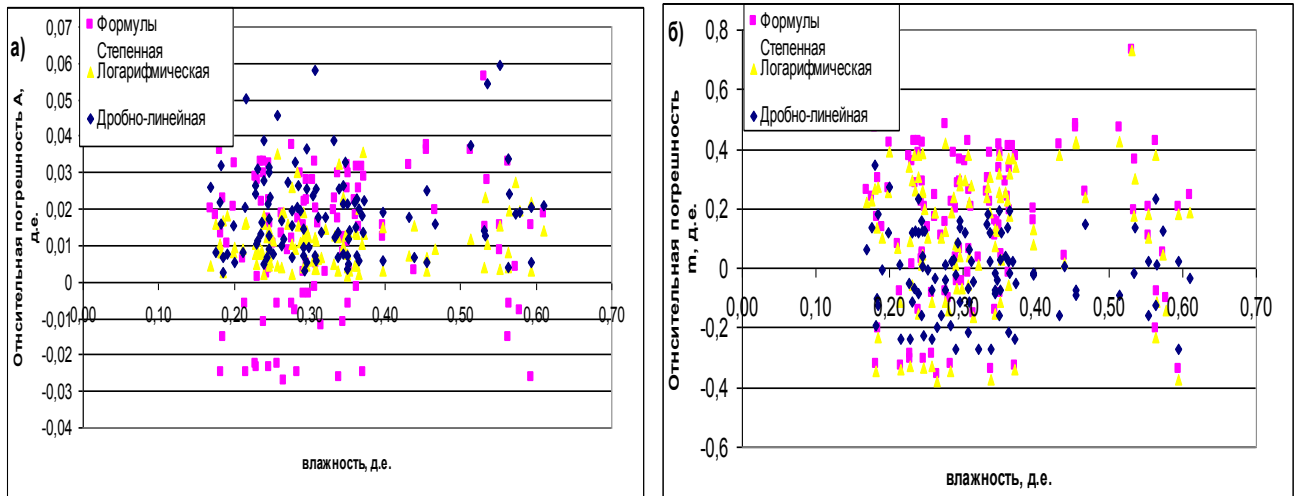


Рисунок 6.3. Зависимости относительной погрешности определения коэффициентов: а) оттаивания; б) сжимаемости от влажности грунтов ненарушенного сложения Таз-Енисейской области

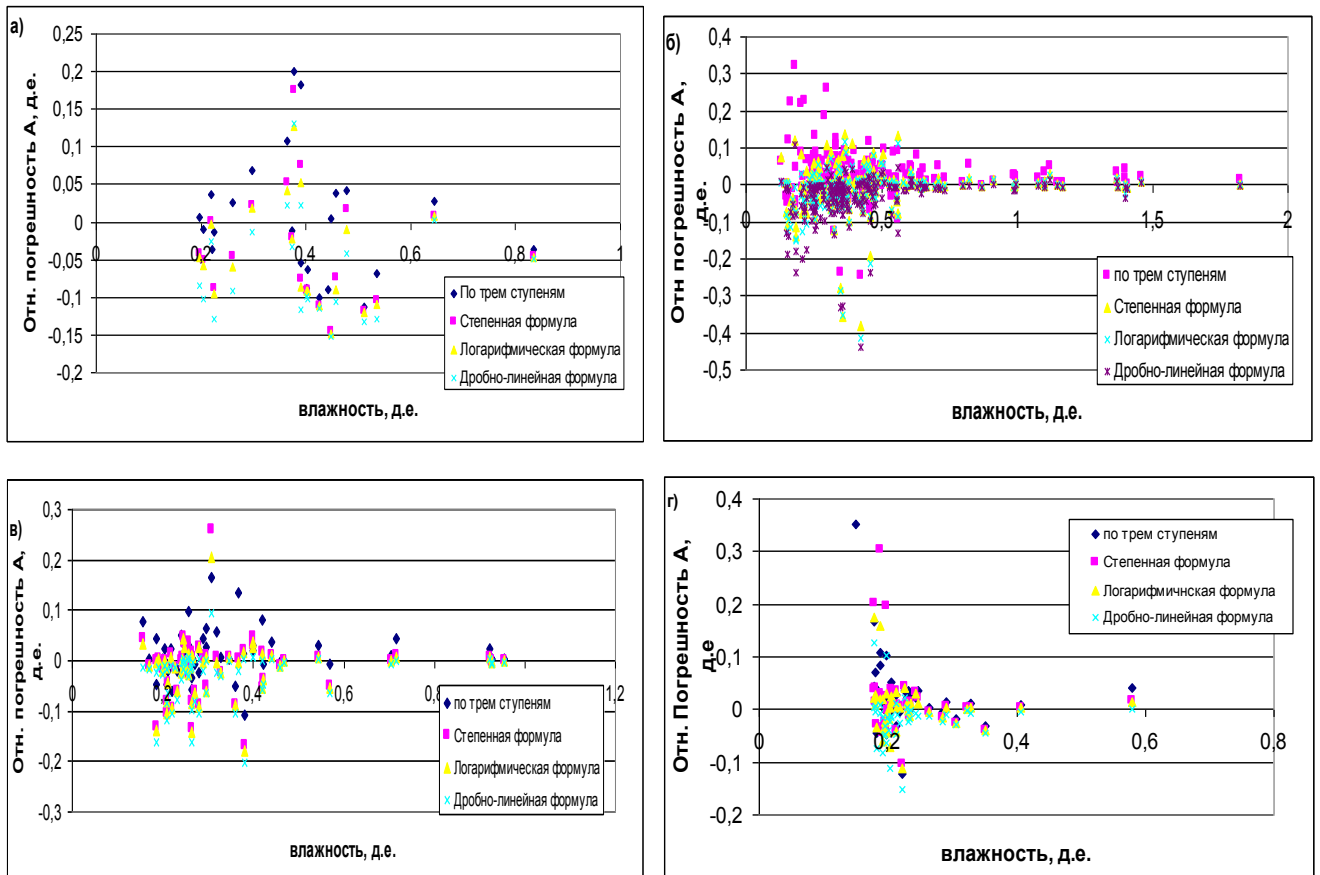


Рисунок 6.4 Зависимости относительной погрешности определения коэффициента оттаивания от влажности: а) глины; б) суглинка; в) супеси; г) песка

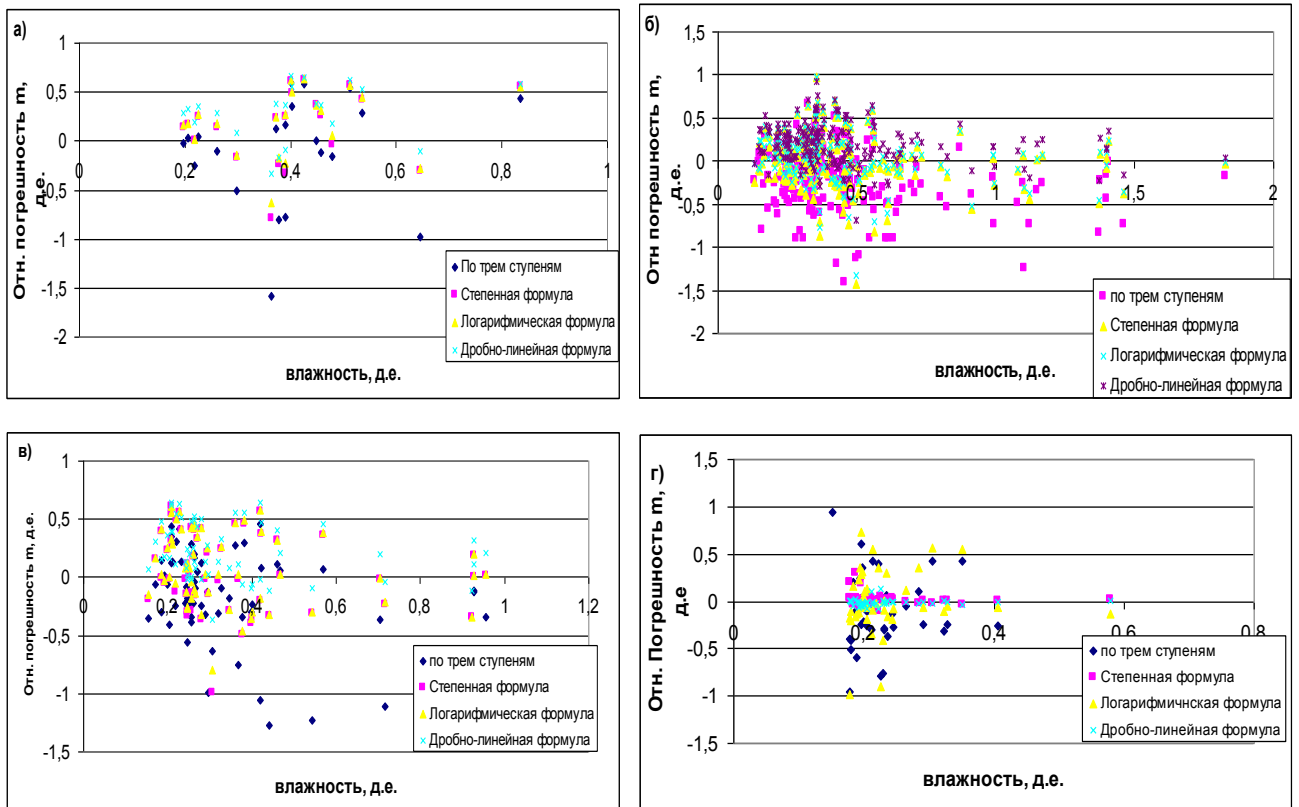


Рисунок 6.5. Зависимости относительной погрешности определения коэффициента сжимаемости от влажности: а) глины; б) суглинка; в) супеси; г) песка

Относительная погрешность определения коэффициента оттаивания по расчетным формулам в большей части случаев (более 90% всех грунтов) не превышает 10%. Наибольшее число значений отклонения было зафиксировано для глины. При этом можно отметить, что с увеличением влажности наблюдается уменьшение относительной погрешности.

Относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости по расчетным формулам достаточно большая для всех видов грунтов. Значения могут отличаться у некоторых образцов практически в 2 раза.

При этом наибольшие отклонения зафиксированы для грунтов, отобранных на полуострове Ямал. Грунты данного региона характеризуются большой льдистостью, слабой литифицированностью и разными криогенными текстурами, что в значительной степени влияет на характер их деформирования. По данным обобщения получено, что для Ямала у 90% опытов относительная погрешность расчета коэффициента оттаивания не превышает 10%, а коэффициента

сжимаемости для 55% опытов не превышает 25%. Таким образом, можно сказать, что в данном регионе затруднительно применение метода аппроксимирования.

Для грунтов, отобранных в районе Ненецкого автономного округа Архангельской области, в целом расчетные и экспериментальные данные имеют достаточно малую относительную погрешность (рисунок 6.6). Так, для суглинка и супеси относительная погрешность расчета коэффициента оттаивания по логарифмической формуле для 95% опытов не превышает 10 %, а для 70% не превышает 5%. Относительная погрешность расчета коэффициента сжимаемости по логарифмической формуле для 90% опытов не превышает 25 %.

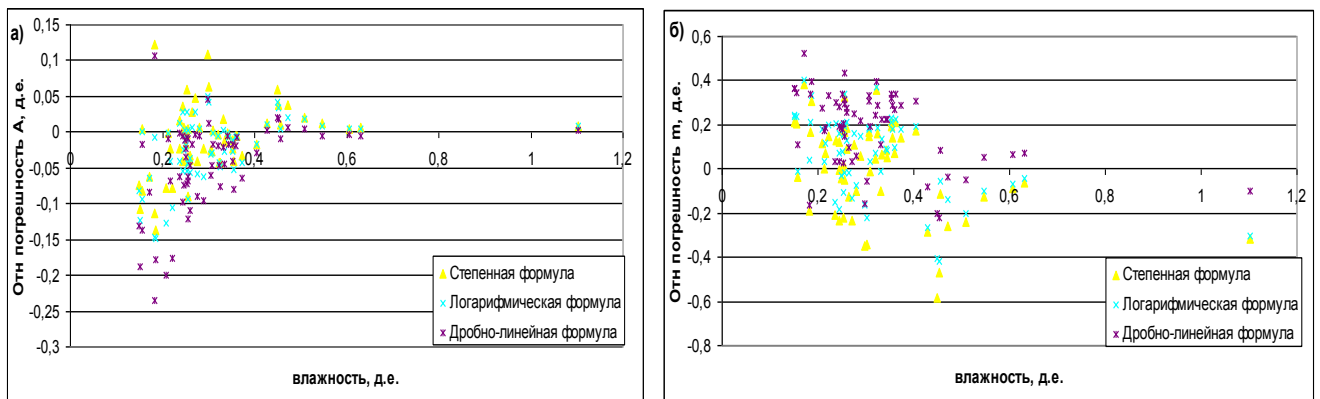


Рисунок 6.6. Зависимость относительной погрешности определения коэффициента: оттаивания (а); сжимаемости (б) от влажности суглинка и супеси

Примерно такие же результаты были получены для грунтов, отобранных в других регионах (таблица 6.1).

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Для всех грунтов расчет по данным только трех ступеней нагружения приводит к наибольшей погрешности определения деформационных характеристик, поэтому необходимо выполнение прогноза деформаций на четвертой и пятой ступени для получения более достоверных результатов.

2. При использовании различных подходов относительная погрешность коэффициента оттаивания для большинства грунтов не превышает 10%, а коэффициента сжимаемости варьируется в широких пределах:

а) для грунтов нарушенного сложения при использовании уравнения 3.14 получена погрешность не более 25%. Но для прогноза деформаций грунтов

ненарушенного сложения Таз-Енисейской области выявлено, что коэффициенты сжимаемости имеют заниженные значения на 25-30%. Это связано с различным характером деформирования грунтов, имеющих в мерзлом состоянии различные криогенные текстуры и строение;

б). для грунтов, отобранных на полуострове Ямал, при использовании второго подхода получена наибольшая относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости. Для остальных регионов были выявлены формулы, при использовании которых была получена относительная погрешность меньше 25% (при значениях коэффициента оттаивания больше 0,03 по данным трех ступеней нагружения). Можно отметить, что нет одной формулы, которая давала бы одинаково достоверные результаты во всех регионах.

Таблица 6.1

Максимальная относительная погрешность определения коэффициента оттаивания (А) и сжимаемости (m) по данным прогноза различными формулами

Регион	Вид грунта	Формула	Наибольшая относительная погрешность определения	
			А	m
Полуостров Ямал	Песок пылеватый	Дробно-линейная	7	14
	Супесь		12	55
	Суглинок	Логарифмическая	10	50
	Глина	Дробно-линейная	15	50
Таз - Енисейская область	Песок пылеватый	Дробно-линейная	3	13
	Супесь		5	24
	Суглинок		7	25
Европейская часть России	Песок	Логарифмическая	4	15
	Супесь		8	21
	Суглинок		10	25
Чукотка	Супесь	Логарифмическая	6	23
	Суглинок	Дробно-линейная	8	24
Ванкорская возвышенность	Песок мелкий	Дробно-линейная	3	11
	Супесь		5	19
	Суглинок	Степенная	7	21

6.2. Расчетные формулы для прогноза осадок

Полученные данные физических и деформационных характеристик грунтов природного сложения различного состава морского, ледово-морского и ледниково-морского генезиса позволяет выявить основные закономерности их изменения. Они базируются на значительном количестве опытов: суглинка (207), супеси (93) и песка пылеватого (45).

Многие исследователи для разработки формул прогноза осадок при оттаивании использовали зависимости осадок оттаивания от простейших показателей свойств, которые надежно и быстро определяются (раздел 1.4). Но при этом незначительное число зависимостей деформационных характеристик от физических свойств. Поэтому для каждого вида грунта выполнен корреляционный анализ для оценки связи каждого показателя физических свойств грунтов с прогнозируемой деформационной характеристикой. Рассматривались парные коэффициенты корреляции между зависимыми величинами.

Показатели свойств грунта условно были разделены на две группы, в которых они тесно коррелируют между собой:

- 1) плотности – плотность мерзлого грунта и скелета грунта;
- 2) влажности – суммарная влажность, степень водонасыщения.

Так как показатели свойств грунта, расположенные в одной группе, тесно связаны между собой, поэтому выбирался один из каждой группы.

После корреляционного анализа выбраны характеристики, которые в наибольшей степени обуславливают деформационные свойства грунта (таблица 6.2).

Как показал анализ, коэффициент сжимаемости незначительно коррелирует с физическими свойствами как мерзлых, так и оттаявших грунтов (рисунок 6.7), поэтому выполнить прогноз данной деформационной характеристики с использованием показателей физических свойств не представляется возможным.

Корреляция коэффициента оттаивания с показателями физических свойств мерзлых грунтов высокая. Наибольшее ее значение характерно для показателей плотности скелета грунта и влажности. Зависимости деформационных

характеристик оттаивающих грунтов от физических свойств имеют наибольшую степень аппроксимации при использовании линейной зависимости (рисунок 6.8, 6.9-а).

Таблица 6.2

Коэффициенты корреляции между показателями физических свойств и деформационных характеристик

Характеристики	Коэффициенты корреляции (по модулю для различных видов грунтов 1/2/3*) между физическими характеристиками и коэффициентами	
	оттаивания A , д.е.	сжимаемости m , МПа ⁻¹
Плотность ρ , г/см ³	0,73/0,64/0,70	0,26/0,37/0,34
Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³	0,77/0,78/0,82	0,26/0,32/0,21
Влажность W , д.е.	0,69/0,78/0,73	0,21/0,17/0,32
Степень водонасыщения S_r д.е.	0,13/0,07/0,16	0,10/0,26/0,22
Нагрузка, МПа	0,36/0,25/0,22	0,35/0,32/0,12

• *- 1- суглинок, 2 – супесь, 3 – песок



Рисунок 6.7. Зависимость коэффициента сжимаемости от коэффициента пористости после оттаивания суглинка.

В связи с этим принят линейный регрессионный анализ, являющийся статистическим методом анализа массивов экспериментальных данных и позволяющий разработать математическую модель, описывающую взаимосвязь между двумя или более переменными.

Наименьшая корреляция коэффициента оттаивания с показателем влажности получена для суглинка, что связано с большим количеством проанализированных экспериментальных данных, а также с большим разнообразием криогенных текстур испытанных образцов.

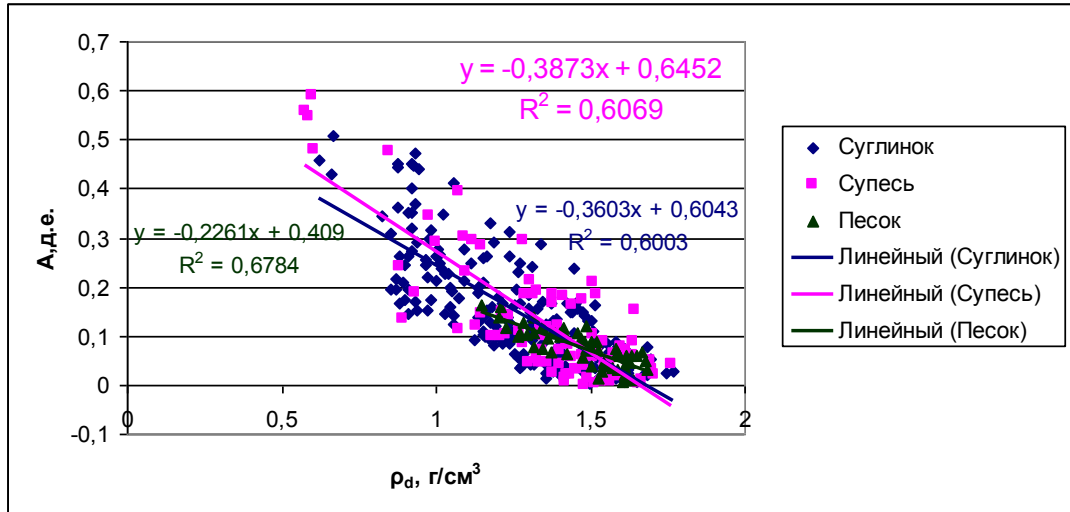


Рисунок 6.8. Зависимости коэффициента оттаивания от плотности скелета различных видов грунтов

Исследования [13, 42] показали, что после оттаивания влажность грунта близка к нижнему пределу пластичности. Таким образом, можно рассматривать показатель изменения влажности при оттаивании, который будет равен разности естественной влажности и влажности нижнего предела пластичности для супеси и суглинка. Анализ таких данных показывает, что коэффициент детерминации, показывающий степень соответствия трендовой модели исходным данным, для супеси увеличивается до 0,66, а суглинка до 0,59 (рисунок 6.9-б). Для суглинка при разности суммарной влажности и влажности нижнего предела пластичности больше 0,55 значения коэффициента оттаивания определяются в основном криогенной текстурой грунта и он равен в среднем 0,5 д.е.

Для повышения достоверности модели рассмотрены различные отношения двух симплексов $(W-W_p)$, $(W-W_p)/S_r$, $(W-W_p)/I_p$, $(W-W_p)/W_L$ и др.). Наибольший коэффициент детерминации получен для глинистых грунтов, при симплексе $(W-W_p)/S_r$ (рисунок 6.9-в). Таким образом, найдены величины, от которых в наибольшей степени зависит коэффициент оттаивания глинистых грунтов: плотность скелета грунта и симплекс – $(W-W_p)/S_r$.

Коэффициент оттаивания песка зависит от плотности скелета и симплекса W/S_r (рисунок 6.10). Именно для этих переменных использовался регрессионный анализ.

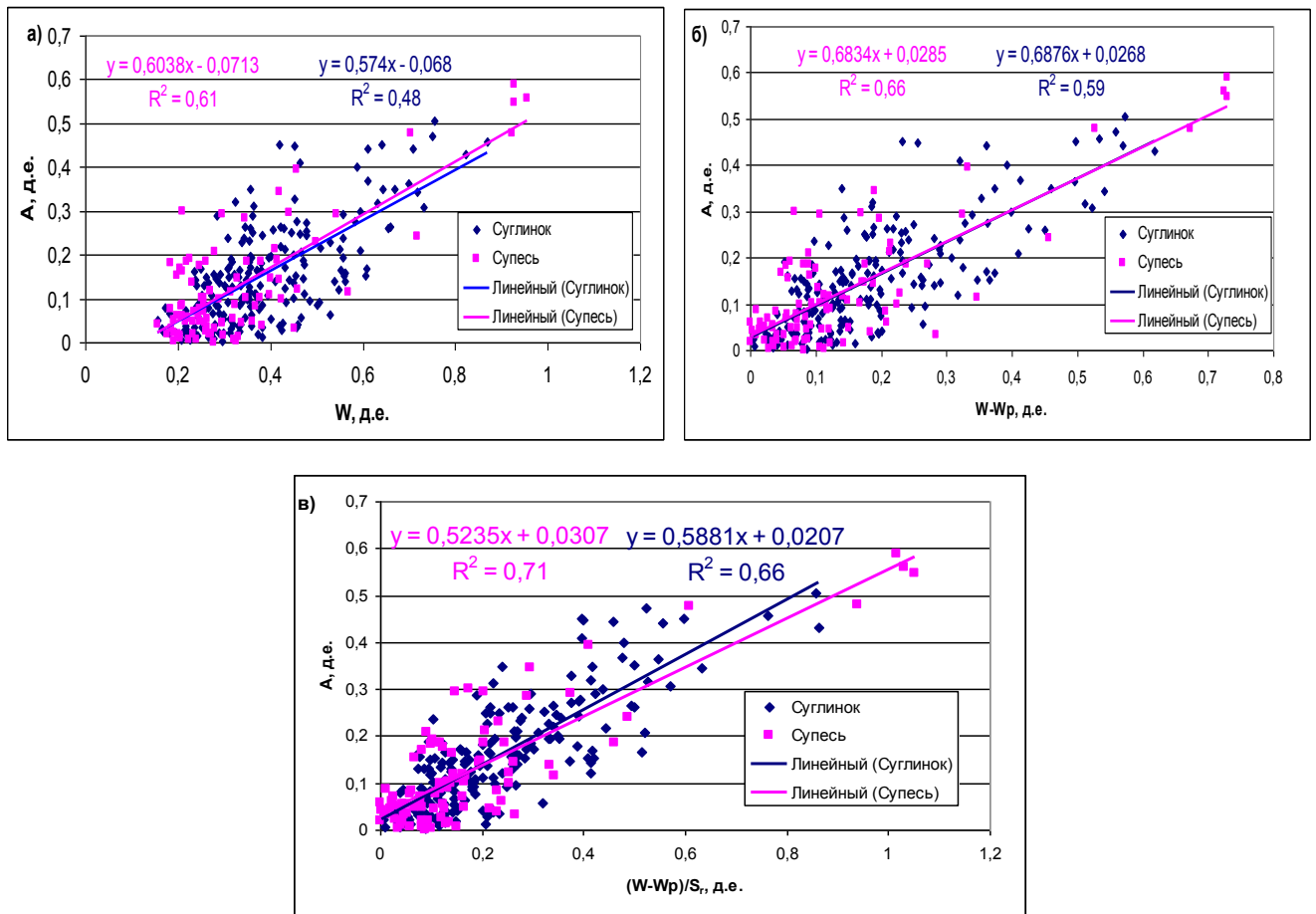


Рисунок 6.9. Зависимости коэффициента оттаивания супеси и суглинка от $W(a), (W - W_p)$ (б), $(W - W_p)/S_r$ (в)

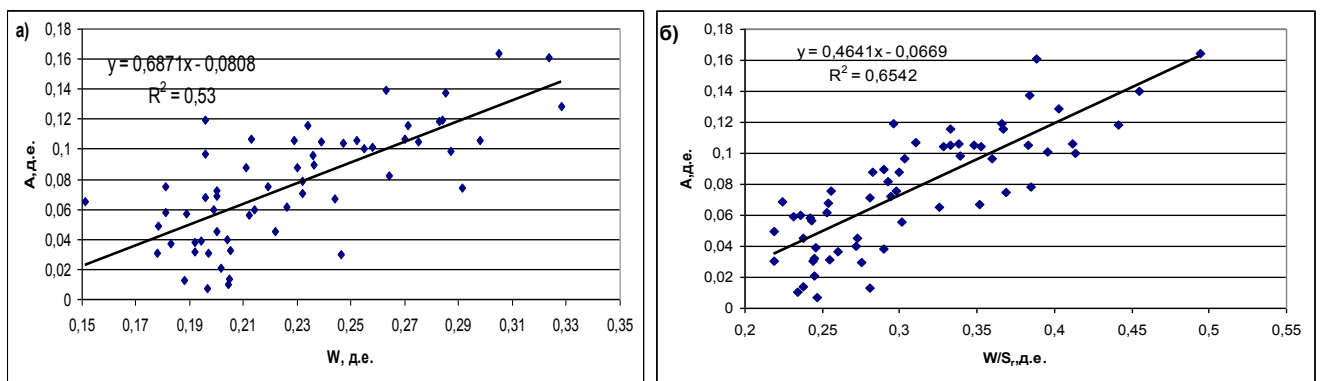


Рисунок 6.10. Зависимости коэффициента оттаивания песка от $W(a), W/S_r$ (б)

Получение уравнения регрессии сводится к оценке ее параметров, используя метод наименьших квадратов (МНК). МНК позволяет получить такие оценки параметров, при которых сумма квадратов отклонений

экспериментальных значений результативного признака от теоретических минимальна.

Качество построенной модели оценивалось коэффициентом детерминации. Коэффициент множественной детерминации рассчитывался как квадрат индекса множественной корреляции. Для того чтобы не допустить преувеличения тесноты связи, применялся скорректированный коэффициент множественной детерминации, который содержит поправку на число степеней свободы ($R^2_{ск}$). Значимость уравнения регрессии, позволяющая установить, соответствует ли математическая модель экспериментальным данным и достаточно ли включенных в уравнение объясняющих переменных (одной или нескольких) для описания зависимой переменной, оценивалась на основе F -критерия Фишера, которому предшествовал дисперсионный анализ.

Фактическое значение F-критерия Фишера сравнивалось с табличным значением при уровне значимости 0,05 и заданных степенях свободы. При этом, если фактическое значение F-критерия больше табличного, то признавалась статистическая значимость уравнения в целом.

Для оценки статистической значимости параметров регрессии рассчитывался t-критерий Стьюдента и доверительные интервалы каждого из показателей. Если табличное меньше фактического значения критерия Стьюдента, то делался вывод о значимости параметров [73].

В результате регрессионного анализа получено, что фактическое значение критерия Фишера во много раз больше табличного, т.е. вероятность случайно получить такое значение F-критерия не превышает допустимый уровень значимости 5% (таблица 6.3). Следовательно, полученные значения не случайны, они сформировались под влиянием существенных факторов. Этим подтверждается статистическая значимость всего уравнения.

Для критерия Стьюдента также получились фактические значения больше табличных, кроме показателя симплекса для песка, поэтому для него получено уравнение для определения коэффициента оттаивания в зависимости только от плотности сухого грунта.

Данные регрессионного анализа

Показатели		Название грунта		
		песок	супесь	суглинок
R ² ск		0,69	0,70	0,68
Стандартная ошибка		0,02	0,07	0,07
Значение критерия Фишера	Фактическое	66,39	126,37	206,72
	Табличное	3,18	3,10	3,04
Значение критерия Стьюдента коэффициента при ρ_d	Фактическое	5,77	3,28	3,97
	Табличное	2,01	1,98	1,97
Значение критерия Стьюдента коэффициента при $(W-W_p)/S$ для глинистых грунтов и W/S для песка	Фактическое	1,99	4,55	6,87
	Табличное	2,01	1,98	1,97

Таким образом, получены следующие регрессионные уравнения для:

песка

$$A=0,416-0,23\rho_d, \quad (6.1)$$

супеси

$$A = 0,32 - 0,187\rho_d + 0,32\frac{W - W_p}{Sr}, \quad (6.2)$$

суглинка

$$A = 0,23 - 0,145\rho_d + 0,393\frac{W - W_p}{Sr} \quad (6.3)$$

Осадка оттаявшего и уплотненного грунта включает две составляющих:

$$S = S_{th} + S_{\sigma,k}, \quad (6.4)$$

где S_{th} – составляющая осадки, обусловленная действием оттаивания и уплотнения от собственного веса оттаявшего грунта; $S_{\sigma,k}$ – составляющая осадки, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса сооружения.

Составляющая осадки S_{th} определяется:

$$S_{om.} = A_{th}h + mh\sigma \quad (6.5)$$

где A_i и m - соответственно коэффициенты оттаивания (доли единицы) и сжимаемости (МПа^{-1}), полученные экспериментально; σ - вертикальное напряжение от собственного веса грунта, МПа; h - толщина слоя оттаивающего грунта, см.

$$S_{\sigma, K} = \sigma_0 b K_h \sum_i^n a_i K_{\mu, i} (K_i - K_{i-1}), \quad (6.6)$$

Составляющая осадки $S_{\sigma, k}$ при расчетной схеме основания в виде линейно-деформируемого слоя конечной толщины, разработанной в механике грунтов [88] и принятой в нормативных документах [72], определяется по формуле (6.6). Объяснение параметров этой формулы дано в главе 1.5. Основной деформационной характеристикой формулы (6.6) является коэффициент сжимаемости, который определяет осадку при прочих равных условиях. Поэтому осадку под действием дополнительной нагрузки мы не сможем определить, вследствие отсутствия корреляции коэффициента сжимаемости и физических свойств.

Рассмотрим формулу 6.5. Наибольший вклад в расчет осадки при оттаивании вносит первый член формулы, равный

$$S_{om.} = A_{th} h \quad (6.7)$$

Это подтверждается расчетом осадок по формулам 6.5 и 6.7 для всех исследованных грунтов с определением относительной погрешности расчета по формуле 6.7 по сравнению с экспериментальными данными для всех видов грунтов (рисунок 6.11). Получено, для 86% грунтов относительная погрешность расчетов по формуле 6.7 не превышает 15%. Эти значения характерны для исследованных образцов при природном давлении меньшим 0,10 МПа.

Таким образом, используя уравнения 6.1-6.3, рассчитана осадка под действием собственного веса при высоте слоя 1 м по формуле 6.7 с использованием коэффициента 1,15, учитывающего, что для 86% грунтов относительная погрешность расчетов по формуле 6.7 не превышает 15%. Для 84 % опытов с глинистыми грунтами и 95 % с песчаными абсолютная погрешность расчета по вышеописанной методике и с использованием экспериментальных данных не превышает 10 см на 1 м оттаянного грунта (рисунок 6.12).

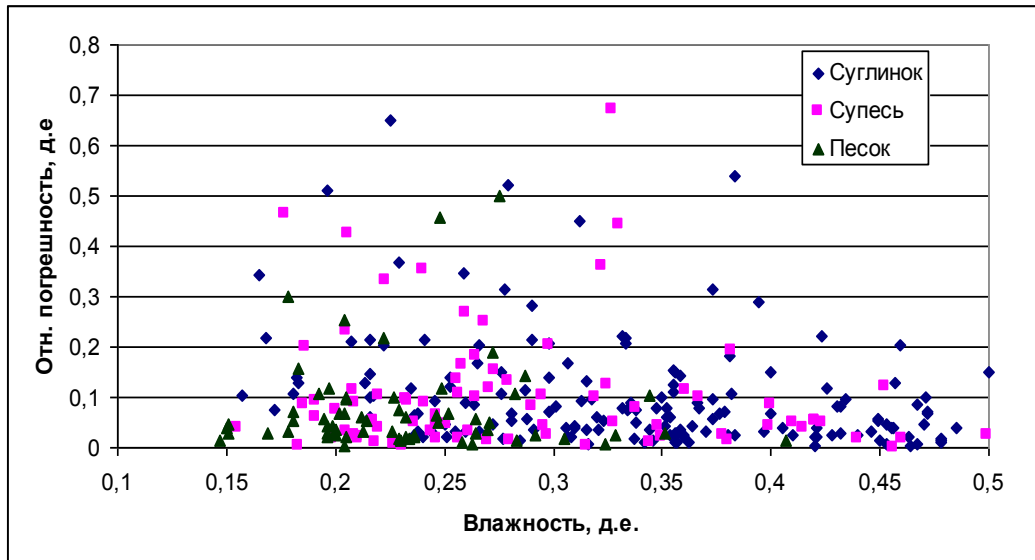


Рисунок 6.11. Зависимость относительной погрешности в расчетных значениях осадки при оттаивании по формуле 7.4 для различных видов грунтов.

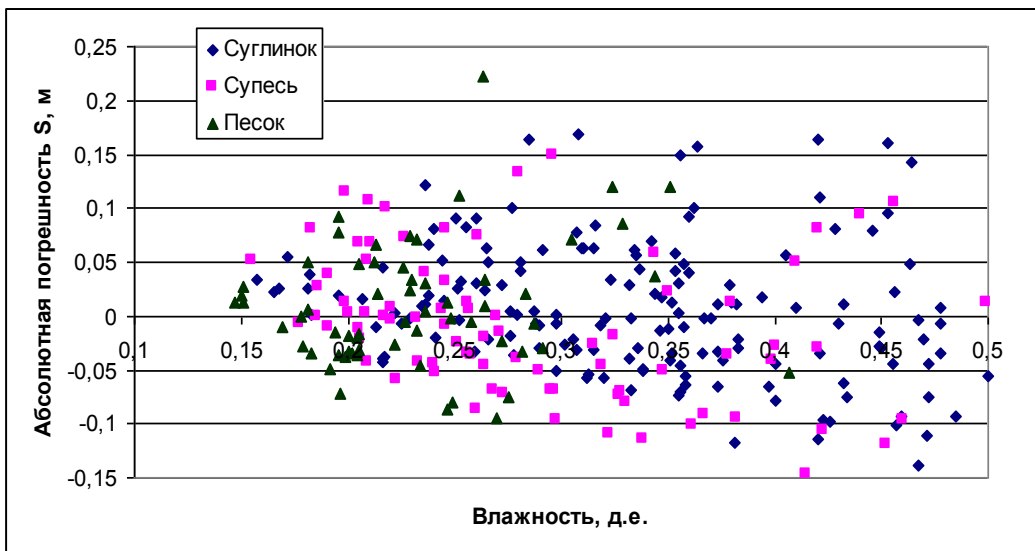


Рисунок 6.12. Абсолютная погрешность значений осадки, рассчитанных с использованием экспериментальных данных и формул 6.1-6.3

Выводы.

1. Установлена достаточно высокая корреляция между показателями свойств мерзлого грунта и коэффициентом оттаивания.
2. Получены регрессионные уравнения для расчета коэффициента оттаивания для песка, супеси и суглинка.
3. Отмечена слабая корреляция коэффициента сжимаемости и физических свойств грунтов как мерзлых, так и оттаявших.
4. Абсолютная погрешность значений осадки, рассчитанных с использованием

экспериментальных данных и формул 6.1-6.3, для 84% опытов с глинистыми грунтами и 95 % с песчаными не превышает 10 см при глубине оттаивания 1 м. Но данный метод прогноза осадок не может быть универсальным, так как коэффициент оттаивания зависит от многих факторов, не поддающихся количественному учету: структура, текстура грунта, физико-механические процессы при оттаивании, условия оттаивания. Поэтому он может использоваться только для предварительной оценки осадки мерзлых грунтов при оттаивании.

6.3. Экспериментально-расчетный метод прогноза осадок

Анализ графиков зависимости отношения относительной осадки после первой ступени нагрузки природным давлением к полной осадке от влажности (рисунок 6.13) показал, что для 78% экспериментов с глинистыми грунтами и 90 % с песчаными более 75% от полной осадки происходит на первой ступени. Этот вывод соответствует также условиям высокой влажности (суглинка более 50%, супеси более 40%), при которой практически 90% осадки сильнольдистых грунтов реализуется в процессе оттаивания и уплотнения под природным давлением.

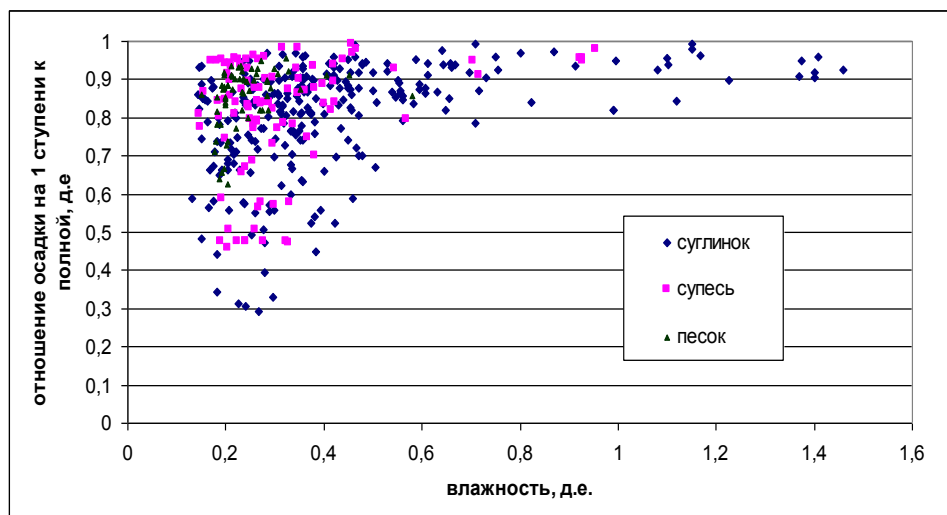


Рисунок 6.13. Зависимость отношения относительной осадки на первой ступени к полной осадке от влажности различных видов грунтов

Это позволяет рассмотреть возможность использования результатов испытаний первой ступени нагружения для прогноза осадок оттаивающего грунта

даже без учета уплотнения мерзлого грунта природным давлением в условиях компрессии, так как данные анализа показали, что осадка в мерзлом состоянии не превышает 5 % от полной осадки. При этом стоит отметить, что температура испытаний в мерзлом состоянии была на 1,5-3°С ниже, чем температуры начала замерзания грунтов. Как показали результаты исследований Сорокина В.А. [70] предварительное обжигание образцов мерзлых грунтов, отобранных до глубины пять метров, природной нагрузкой практически не влияет на величину осадки при оттаивании. Указанные данные позволяют не учитывать деформацию грунта в мерзлом состоянии.

Процесс консолидации грунта при оттаивании может занимать от 24 ч до 120 ч., поэтому для сокращения периода испытаний расчеты относительной осадки проводились на основе данных восьмичасовых испытаний грунтов с дальнейшим прогнозом изменения относительной осадки по степенной, логарифмической и дробно-линейной формулам (рисунок 6.14). Восемь часов – это минимальное время, если увеличить количество часов в испытании, то прогноз будет точнее. Прогноз проводился на 48 ч., так как в большинстве рассмотренных случаев при указанном времени происходило окончание первой степени нагружения.

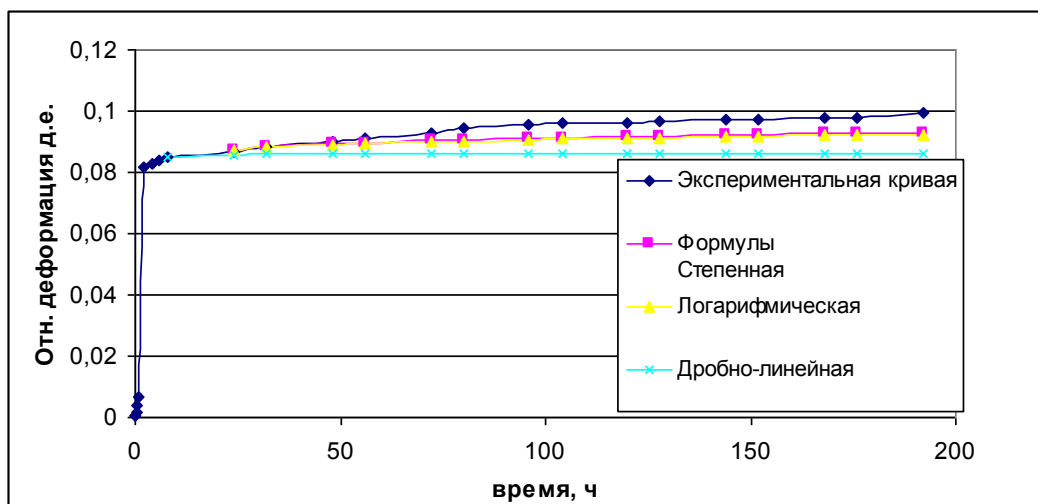


Рисунок 6.14. Зависимость относительной осадки от времени на первой степени нагружения суглинка ($W=31\%$, $\rho=1,74 \text{ г/см}^3$)

Наиболее высокая аппроксимация получена для степенной функции. Проверка возможности расчета относительной осадки по данным восьмичасовых

выполнена по данным 20 опытов с песком, 31 с супесью и 73 с суглинком морского и ледово-морского генезиса с различными значениями показателей свойств грунтов. Затем проведены расчеты относительной осадки по данным восьмичасовых измерений на 48 часов по степенной формуле для каждого вида грунта, и получены значения относительной погрешности определения относительной осадки на первой ступени (рисунок 6.15).

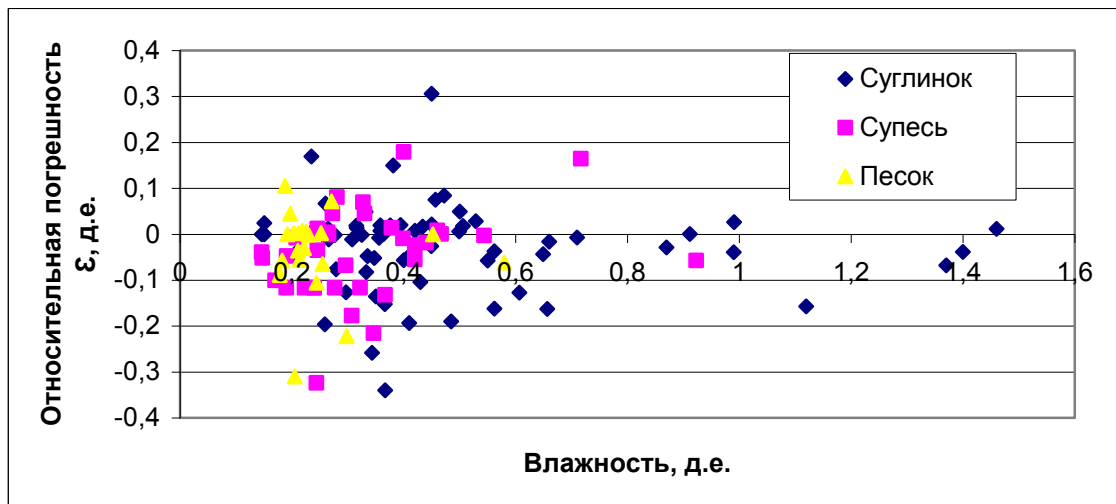


Рисунок 6.15. Зависимость относительной погрешности относительной осадки различных видов грунтов от влажности на первой ступени, рассчитанных по степенной формуле

Анализ графиков показывает, что в целом расчетные значения имеют завышенные значения по сравнению с экспериментальными. Для 80 % опытов относительная погрешность не превышает 10%. Наибольшая погрешность оказалась характерной для суглинка. Таким образом, данный метод прогноза относительной деформации может быть использован.

Экспериментально получаем значение относительной деформации на первой ступени равной

$$\varepsilon_1 = A_1 + m_1 \sigma_1, \quad (6.8)$$

где ε_1 - относительная деформация на первой ступени, где A_1 и m_1 - соответственно коэффициенты оттаивания (д.е.) и сжимаемости (МПа^{-1}), σ_1 - напряжение на первой ступени.

Определив относительную деформацию ε_1 и зная нагрузку σ_1 , рассчитываем деформационные характеристики следующим образом. В результате анализа

компрессионных испытаний грунтов ненарушенного сложения выявлена линейная зависимость коэффициента оттаивания от относительной осадки на первой ступени (рисунок 6.16). Эта зависимость имеет линейный характер, так как на этом основан метод определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов, который устанавливает линейную зависимость между действующим напряжением и относительной осадкой. При этом коэффициент детерминации (R^2) для всех видов грунтов равен 0,99.

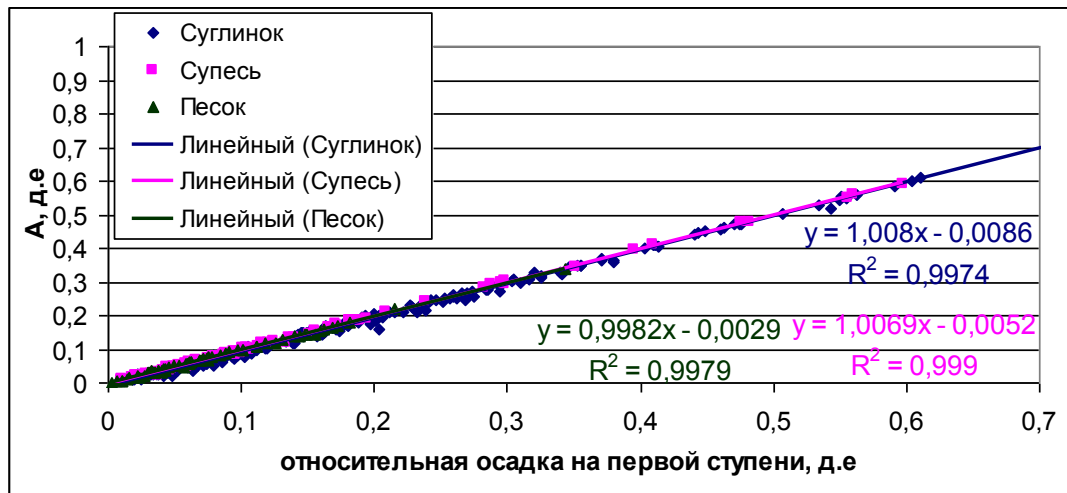


Рис. 6.16. Зависимость коэффициента оттаивания от относительной осадки на первой ступени.

Были получены следующие уравнения для расчета коэффициента оттаивания:

песка

$$A = \varepsilon_1 * 0,9982 - 0,0029 \quad (6.9)$$

супеси

$$A = \varepsilon_1 * 1,0069 - 0,0052 \quad (6.10)$$

суглинка

$$A = \varepsilon_1 * 1,008 - 0,0086 \quad (6.11)$$

Используя значения коэффициента оттаивания, относительной деформации и нагрузки на первой ступени, можно рассчитать коэффициент сжимаемости.

Зависимости относительной погрешности расчета деформационных характеристик различных видов грунтов от влажности с использованием вышеописанной методики по сравнению с экспериментальными данными

представлены на рисунке 6.17.

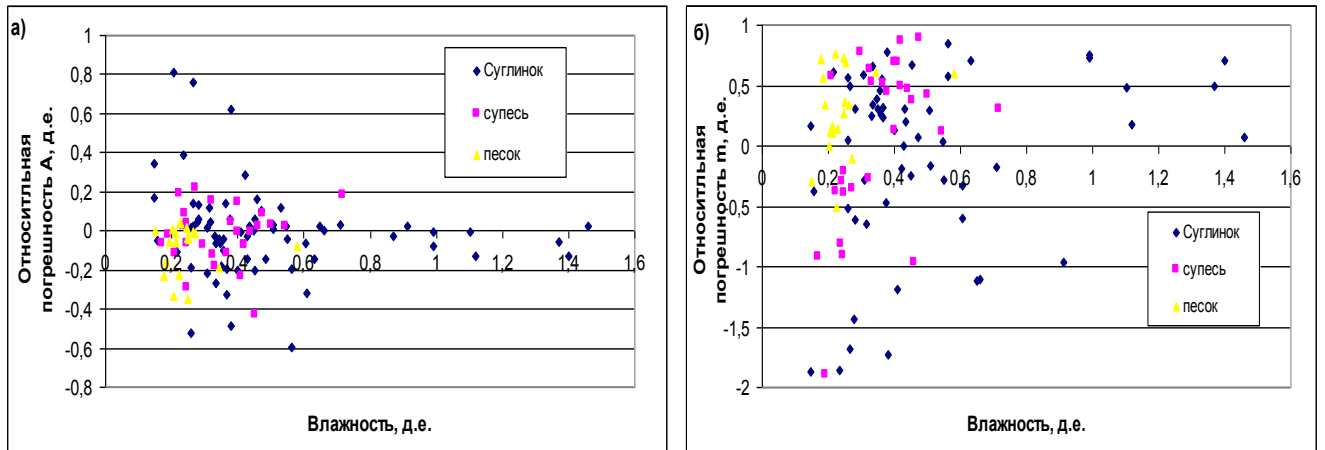


Рисунок 6.17. Зависимости относительной погрешности определения коэффициентов: а) оттаивания; б) сжимаемости от влажности для разных видов грунтов

Для песка (90 % опытов) относительная погрешность определения расчетного значения коэффициента оттаивания не превышает 10%, а коэффициента сжимаемости 50 %; для супеси и суглинка в 88 % опытов относительная погрешность коэффициента оттаивания не превышает 20%. Относительная погрешность коэффициента сжимаемости глинистых грунтов варьируется в широких пределах, поэтому данная методика может использоваться лишь для предварительной оценки этого параметра. На основе обобщения данных деформационных характеристик получены значения коэффициентов сжимаемости, характерные для морских, ледниково-морских и ледово-морских отложений, которые могут быть использованы для предварительных расчетов (таблица 6.4). В таблице представлены значения, характерные для 90% опытов каждого вида грунта, так как исключались одиночные значения, выпадающие из общего диапазона.

Для проверки целесообразности проведения экспериментальных исследований были проведены расчеты осадок грунтов по различным формулам и их значения сравнивались с полученными экспериментальным путем.

Расчет проводился по регрессионным формулам для коэффициента оттаивания (формулы 6.1-6.3), полученных для разных видов грунтов. Также по формуле для коэффициента оттаивания, предложенной Г.И. Клиновой [44]:

$$A_{th} = 0,934 - 0,650\rho_d \quad (6.12)$$

Таблица 6.4

Значения коэффициентов сжимаемости разных генетических типов грунтов

Генезис отложений	Вид грунта	Диапазон изменения	
		влажности, д.е.	коэффициента сжимаемости, МПа ⁻¹
Морской	глина	0,23-0,54	0,2-0,55
	суглинок	0,18-1,46	0,05-0,30
	супесь	0,17-0,96	0,02-0,2
	песок	0,15-0,35	0,02-0,1
Ледово-морской	суглинок	0,16-1,1	0,05-0,35
	супесь	0,25-0,92	0,04-0,16
	песок	0,18-0,43	0,02-0,07

Кроме этого, расчеты были проведены по формулам Федосова А.Е., Гольдштейна М.Н., Пчелинцева А.М., Бакунина Ф.Г. и Жукова В.Ф., Киселева М.Ф., Ушкалова В.П. (см. табл. 1.3). Все расчеты проводились для одинаковой глубины оттаивания, равной один метр, и сравнивалась абсолютная погрешность расчетов по отношению к данным расчета по экспериментально определенным значениям деформационных характеристик (рисунок 6.18). При этом получено, что формула Гольдштейна М.Н. дает самую большую абсолютную погрешность более 0,5 м при оттаивании всего на 1м. Поэтому она не рассматривалась. Предложенный экспериментально-расчетный метод является наиболее точным, так как абсолютная ошибка расчета осадки не превышает 10 см (в среднем 4 см) для всех глинистых грунтов и 2 см для песчаных при общей глубине оттаивания 1 м.

Для всех видов грунтов из расчетных формул наибольшее приближение характерно для регрессионной (для 50% опытов с песком абсолютная погрешность меньше 2 см, 75 % опытов с глинистыми грунтами абсолютная погрешность меньше 10 см). Для 61 % значений супеси, рассчитанных по формулам Федосова А.Е., Пчелинцева А.М., Бакунина Ф.Г. и Жукова В.Ф.,

Ушкалова В.П., и для 59 % значений суглинка, рассчитанных по формулам Бакунина Ф.Г. и Жукова В.Ф., Ушкалова В.П., получены такие же погрешности расчета осадок, как при расчетно-экспериментальном методе. Для расчетов по всем остальным формулам абсолютная погрешность для 50 % опытов больше 10 см.

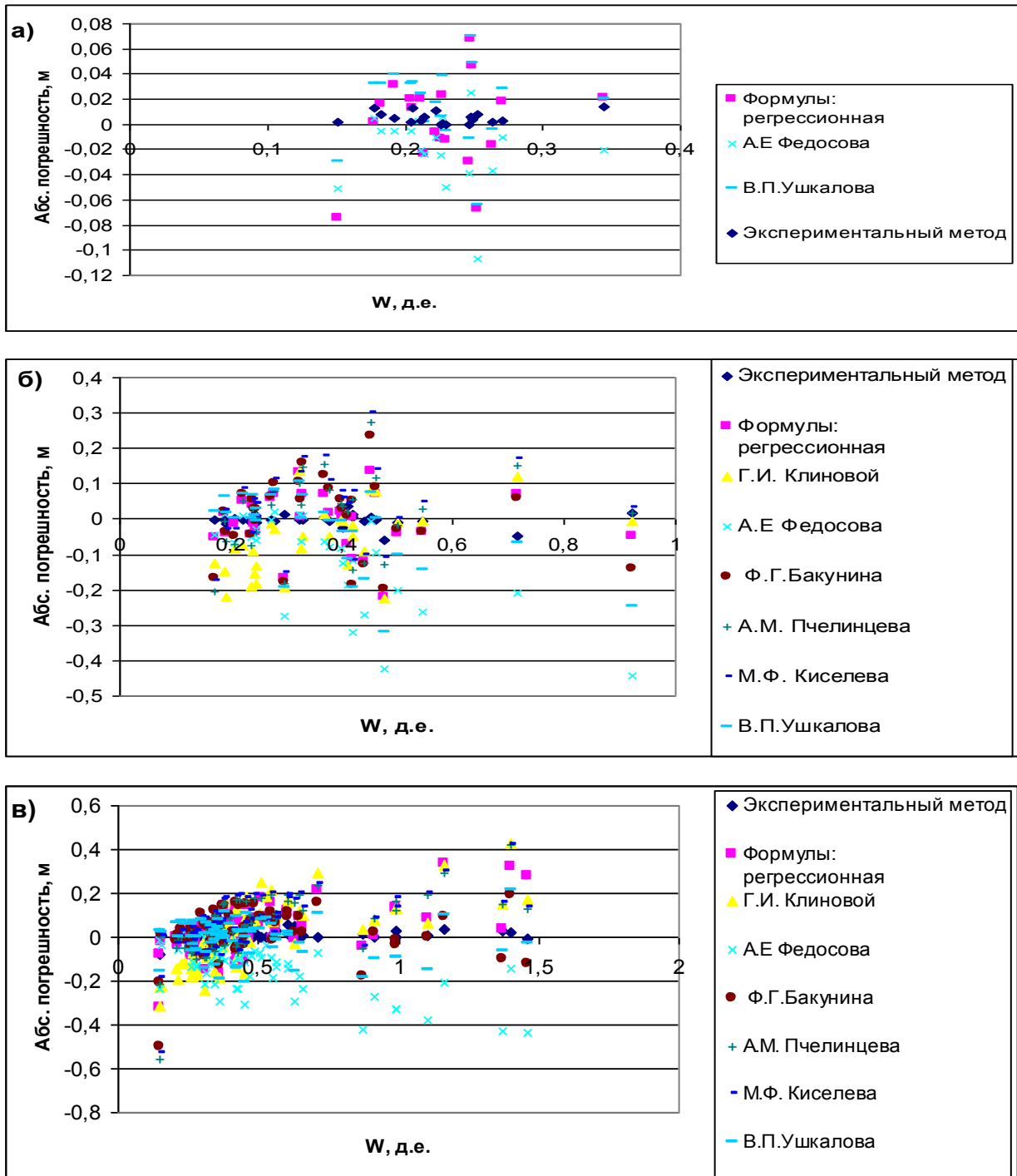


Рис 6.18. Абсолютная ошибка значений осадки под действием собственного веса, рассчитанных по расчетным формулам и экспериментальным данным для: а) песков, б) супесей, в) суглинков.

Таким образом, получено, что экспериментальный метод определения осадок по данным восьмичасовых исследований является наиболее точным по сравнению с расчетами по данным компрессионных испытаний, выполненных в соответствии с ГОСТ 12248-2010.

Получено, что регрессионные формулы, предложенные в разделе 6.2, для данных образцов более точны для расчета осадок, но необходимо проверить применение этих формул на образцах, которые не входили в регрессионную модель.

С целью проверки проведены расчеты для образцов, отобранных в районе уральского берега Байдарацкой губы в пределах прибрежной части I морской террасы, сложенной морскими супесчано-суглинистыми отложениями с прослоями песков пылеватых. Мощность отложений составляет в среднем 4-10 м. Суммарная влажность суглинков колеблется от 25 до 52 %, плотность варьирует в пределах 1,20-1,89 г/см³. Грунты льдистые, в верхней части разреза – сильнольдистые, криогенная текстура сетчатая. Суммарная влажность супесчаных грунтов колеблется от 23 до 41%, плотность варьирует в пределах 1,71-1,95 г/см³. Грунты льдистые, криогенная текстура сетчатая, слоисто-сетчатая. Пески включают отдельные линзы гравийно-галечного материала. Суммарная влажность колеблется от 20 до 34 %, плотность варьирует в пределах 1,6-1,98 г/см³. Пески обладают преимущественно массивной криогенной текстурой.

Расчеты проведены для 11 образцов песка, 21 - супеси и 37 - суглинка. Проведены также расчеты по выявлению абсолютной ошибки экспериментальных данных и рассчитанных по тем же формулам, что и в предыдущем случае при оттаивании грунта на 1 м (рисунок 6.19).

В результате получено, что для всех видов грунтов, отобранных в районе уральского берега Байдарацкой губы, экспериментальный метод прогноза также наиболее точный по сравнению с расчетными формулами. Получено что для песчаных грунтов наибольшее приближение характерно при выполнении расчетов по регрессионной формуле и формуле Ушкалова В.П., а для глинистых - по регрессионным формулам и формулам Бакунина Ф.Г. и Жукова В.Ф.,

Ушкалова В.П (75% значений имеет абсолютную погрешность меньше 10 см.).

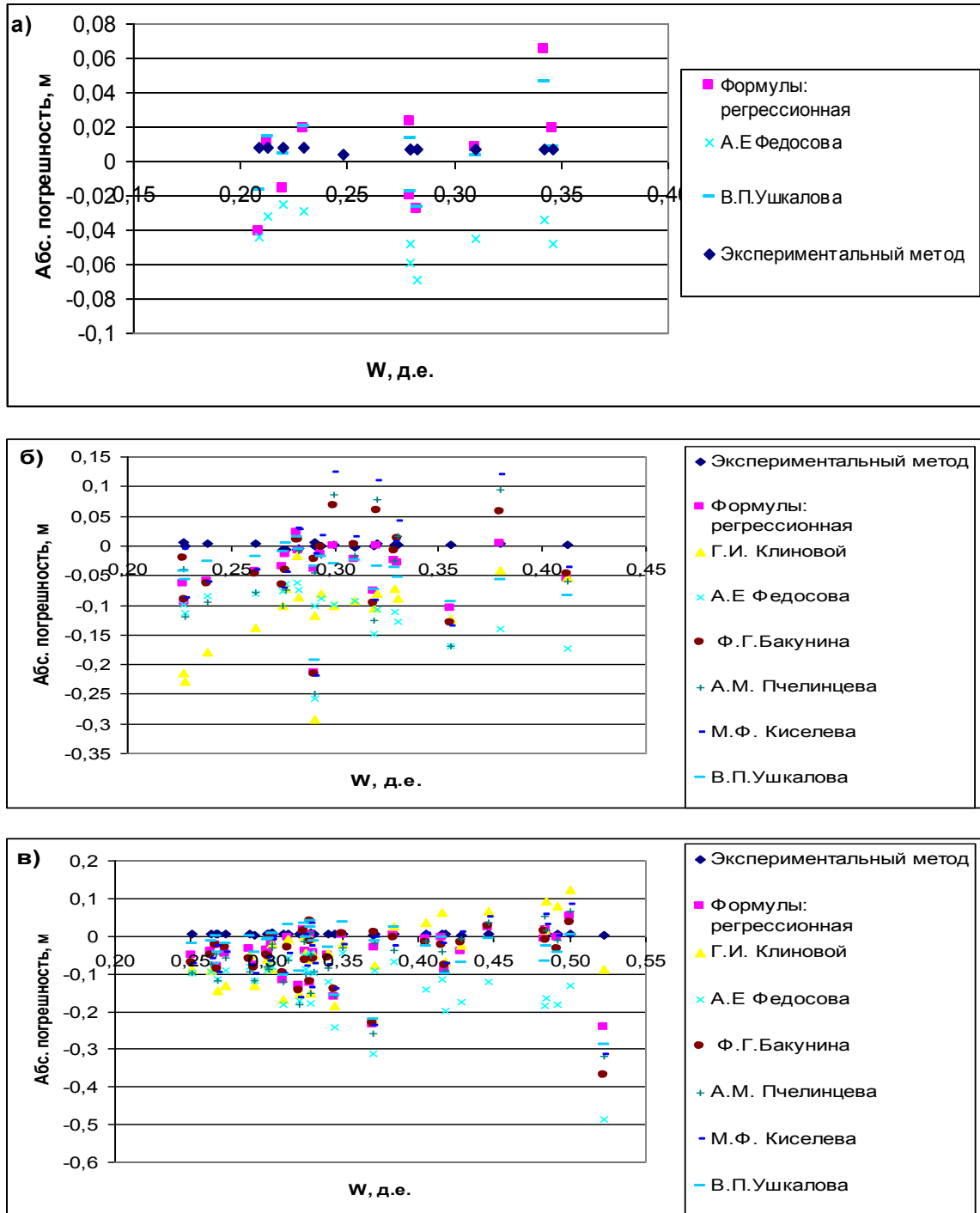


Рисунок 6.19. Абсолютная ошибка значений осадки под действием собственного веса, рассчитанных по расчетным формулам и экспериментальным данным для: а) песков, б) супесей, в) суглинков

Таким образом, получено, что экспериментальный метод определения стабилизированных осадок оттаивания при сокращенном периоде испытаний является наиболее точным по сравнению с расчетными формулами. Поэтому можно предложить следующую методику экспресс оценки осадок грунтов,

которая может быть применена в полевых лабораторных условиях.

1. Подготовка образцов осуществляется для всех видов грунтов, как для обычного компрессионного испытания.
2. Образцам в мерзлом состоянии прикладывается природная нагрузка и начинается оттаивание.
3. Испытания допускается проводить при всестороннем оттаивании
4. Экспериментально определяется осадка грунта с ее фиксацией не реже одного часа на период не менее восьми часов.
5. Стабилизированная осадка оттаявшего грунта под действием природного давления рассчитывается с использованием степенной формулы:

$$\varepsilon_1 = S_n * t^B$$

где t – время, равное 48 ч., ε_1 – расчетная относительная деформация, д.е., S_n , B – параметры, определяемые расчетом (гл. 3.3)

6. Расчет осадки проводится по формуле:

$$S = \varepsilon_1 h$$

где ε_1 – относительная условно-стабилизированная деформация после первой ступени, д.е., h – толщина слоя оттаивающего грунта, см.

7. Коэффициент оттаивания вычисляется с относительной погрешностью до 20 % по формулам для:

песка

$$A = \varepsilon_1 * 0,9982 - 0,0029$$

супеси

$$A = \varepsilon_1 * 1,0069 - 0,0052$$

суглинка

$$A = \varepsilon_1 * 1,008 - 0,0086$$

где ε_1 – относительная деформация после первой ступени, д.е., A – коэффициент оттаивания, д.е.

8. Возможна приближенная оценка коэффициента сжимаемости по данной методике. Предварительный расчет осадки оснований сооружений возможен при выполнении испытаний при нагрузке, превышающей природную, либо

используя максимальные значения коэффициентов сжимаемости, полученные в зависимости от генетического типа грунта, представленные в таблице 6.4.

Выводы

Анализ возможности применения двух подходов для прогноза деформаций при компрессии с целью сокращения периода испытаний показал следующее.

- Сокращение числа ступеней нагружения до трех приведет к значительным погрешностям определения деформационных характеристик.
- Метод прогноза относительной деформации по первой методике с использованием параметрических уравнений применим не для всех образцов, что связано с различием в строении грунтов, влияющее на характер деформирования грунтов при уплотнении после оттаивания. Метод прогноза относительной деформации, заключающийся в подборе эмпирической формулы на основании опытных данных трех ступеней нагружения, дающий наиболее точное описание зависимости стабилизированных осадок от времени, показал, что для грунтов, отобранных на полуострове Ямал, характеризующихся большой льдистостью, слабой литифицированностью и различными криогенными текстурами, относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости превышает 25 %, а для грунтов других регионов указанная погрешность ниже.

На основе регрессионного анализа экспериментальных данных (более 400 образцов) получены зависимости коэффициента оттаивания от состава и свойств грунтов (уравнения (6.1) - (6.3), что позволило сформулировать третье защищаемое положение.

Предложены два экспресс метода определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов на основе обработки опытных данных методом регрессионного анализа и обоснованной возможности сокращения периода испытаний. Показана возможность использования указанных экспресс

методов для определения деформационных характеристик на стадии инженерных изысканий с целью прогноза осадок оттаивающих грунтов. Этот вывод подтверждает четвертое защищаемое положение.

Заключение

Комплексная методика исследований деформаций оттаивающих грунтов, включающая экспериментальные испытания, математическое моделирование, прогноз осадок на основе параметрических уравнений позволила установить следующие закономерности.

1. Коэффициент оттаивания (A) увеличивается в условиях всестороннего оттаивания по сравнению с односторонним. Коэффициент сжимаемости (m) имеет более высокие значения при одностороннем оттаивании по сравнению со всесторонним. Средние значения и дисперсии деформационных характеристик, полученные при разных условиях оттаивания, весьма близки. Это позволяет сделать вывод о возможности использования обеих методик определения деформационных характеристик на стадии инженерных изысканий.

2. Результаты математического моделирования по программе «Termoground» позволили дать качественную оценку влияния условий оттаивания и уплотнения на осадку оттаивающих грунтов. При всестороннем оттаивании в компрессионных условиях осадка на 5-20 % больше. Расчетные значения деформационных характеристик при компрессионных испытаниях на 5-50 % больше по сравнению с данными полевых испытаний горячими штампами, что обусловлено различием процесса формирования напряжения в грунте при оттаивании и уплотнении.

3. Сокращение числа ступеней нагружения до трех приведет к значительным погрешностям определения деформационных характеристик. Прогноз относительной деформации уплотнения на последующих ступенях методом аппроксимации опытной кривой стабилизированной осадки от времени по различным уравнениям дает погрешность определения коэффициента оттаивания до 10 %, а сжимаемости для исследуемых грунтов до 25 %, а грунтов полуострова Ямал до 50 %. Это связано с их повышенной льдистостью, слабой степенью литификации отложений морского генезиса.

4. Результаты обобщения данных компрессионных испытаний (около

400 различных грунтов ненарушенного сложения) позволили разработать две экспресс методики расчета осадок под действием природного давления.

- Расчеты по методике, основанной на использовании регрессионных уравнений для расчета коэффициента оттаивания, показали, что абсолютная погрешность значений осадки не превышает 10 см при глубине оттаивания 1 м для 84 % опытов с глинистыми грунтами и 95 % с песчаными. Эти уравнения могут быть использованы для предварительной оценки осадки оттаивающих грунтов.

- Расчеты по методике, основанной на использовании опытных данных при сокращенном периоде испытаний грунтов при оттаивании, дают наиболее точные результаты в сравнении с расчетными уравнениями. Эта методика может использоваться для проведения лабораторных испытаний грунтов при инженерных изысканиях.

Список литературы

1. Агафонов, А.В. Использование конечноэлементного анализа для расчета на прочность подземных трубопроводов с учетом тепловых деформаций грунтов / А.В.Агафонов, В.А. Ворков //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. - т.12, №4(3).– с. 535-539
2. Аржанов, М.М. Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов северного полушария в XXI веке / М.М. Аржанов, П.Ф. Демченко, А.В. Елисеев, И.И.Мохов // Криосфера Земли. – 2010. - т. XIV, № 3. - с. 37–42
3. Аткачис, В.С. Методика инженерно-геологических изысканий на участке Чара-Тында / В.С. Аткачис // Транспортное строительство.- 1977. - № 10. - с. 12-17
4. Бакулин, Ф.Г. Деформации мерзлых дисперсных грунтов при оттаивании / Ф.Г.Бакулин, В.Ф. Жуков // Изв. «АН СССР.ОТК». – 1955.- №7.- С. 132-136.
5. Бакулин, Ф.Г. Физические явления и процессы в оттаивающих грунтах / Ф.Г.Бакулин, Б.А.Савельев, В. Ф. Жуков // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР. – 1957. - С.72-83.
6. Бакулин, Ф.Г. Льдистость и осадки при оттаивании многолетнемерзлых четвертичных отложений Воркутинского района / Ф.Г. Бакулин - Москва: Изд-во АН СССР, 1958. - 96 с.
7. Бондарев, П.Д. Осадка при оттаивании льдистых грунтов поймы р. Оби в района Салехарда / П.Д. Бондарев // Труды Ин.-та мерзлотоведения, т.ХІХ, изд-во АН СССР. – 1958. – с. 70-80
8. Брушков, А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства/ А.В. Брушков - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 332 с.
9. Власов, А.Н. Некоторые особенности геотехнического моделирования с помощью SIMULIA ABAQUS / А.Н. Власов, Д.Б. Волков-Богородский, М.Г. Мнушкин, С.Н. Тропкин //Труды международной научно-практической конференции “Инженерные системы - 2010”, М.: Изд-во РУДН.- 2010 - с. 78-88.
10. Войтковский, К.Ф. Механические свойства льда. / К.Ф. Войтковский - М.:

Изд-во АН СССР, 1960. - 99 с.

11. Вотяков, И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / И.Н. Вотяков - Нов-ск: Изд-во Наука, 1975. - 174 с.
12. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов - М.: Высшая школа, 1978 - 447с.
13. Гольдштейн, М.Л. Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании / М.Л. Гольдштейн - М.: Трансжелдориздат. – 1948 - вып. 16.
14. Горохов, Е.Н. Обеспечение экологической безопасности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан» на участках, проложенных многолетнемерзлых грунтах / Е.Н. Горохов, Е.В. Копосов, С.В. Соболев, В.И. Ларионов, М.А. Козлов, А.А. Маленов // Приволжский научный журнал. - 2011. - №3. - С. 158-164.
15. ГОСТ 30416 96. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. - М.: МНТКС. 1996. - 22 с.
16. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. - М.: Стандартинформ, 2011. - 109 с.
17. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. - М.: Госкомитет по делам строительства. 1979. - 24 с.
18. ГОСТ 20522-96. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик. - М.: МНТКС, 1997. - 28 с.
19. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. - М.: Стандартинформ, 2013 - 42с.
20. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических свойств. М.: Госкомитет по делам строительства, 1984.- 17 с.
21. ГОСТ 20276-99. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. - М.: ГУП ЦПП, 2000. -89 с.
22. Гречищев, С.Е. Основы моделирования криогенных физико-геологических

- процессов / С.Е. Гречищев, Л.В. Чистотинов, Ю.Л. Шур - М.: Наука, 1984.-230 с.
23. Давыдочкин, А.Н. Полевая оценка льдистости и просадочности мерзлых глинистых грунтов / А.Н. Давыдочкин // Тр. совещ. По инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. -1957 - Т. II.- с. 249-254.
24. Докучаев, В.В. Взаимодействие оттаивающих оснований с фундаментами, рассматриваемыми как составные элементы конструкций / В.В. Докучаев, Л.И. Неймарк, А.И. Золотарь // Оттаивающие грунты как основание сооружений М.: Наука. - 1981. - С. 14-27.
25. Ершов, Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах / Э.Д. Ершов - М.: Изд-во МГУ, 1979. -213с.
26. Ершов, Э.Д. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Э.Д. Ершов - М.: Изд-во МГУ, 1985. -167 с
27. Ершов, Э.Д. Физико - химия и механика мерзлых пород / Э.Д. Ершов - М.: Изд-во МГУ, 1986.-332 с.
28. Ершов, Э.Д. Микростроение мерзлых грунтов / Э.Д. Ершов, Ю.П. Лебедеенко, Е.М. Чувилин, О.М. Язынин - М.: Изд-во МГУ, 1988-183с.
29. Ершов, Э.Д. Методы определения механических свойств мерзлых грунтов / Э.Д. Ершов, Л.Т. Роман - М.:Изд-во МГУ. 1995 - 161 с.
30. Жуков, В.Ф. Расчет осадки протаивающего слоя горной породы с учетом нагрузки / В.Ф. Жуков // Сборник статей по инженерному мерзлотоведению. М.: Изд-во АН СССР.- 1954.- С.60-63.
31. Жуков, В.Ф. Предпостроечное оттаивание многолетнемерзлых пород при возведении на них сооружений / В.Ф. Жуков -М.: Изд-во АН СССР, 1958.148 с.
32. Зарецкий, Ю.К. Теория консолидации грунтов / Ю.К. Зарецкий М.: Изд-во Наука, 1967. - 270 с.
33. Зарецкий, Ю.К. К расчету осадок оттаивания грунта / Ю.К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов - 1968. - №3 - с. 10-12.
34. Зарецкий, Ю.К. Вязкопластичность льда и мерзлых грунтов /Ю.К.Зарецкий, Б.Д. Чумичев, А.Г. Щеболев - М.: Наука, 1986. - 182 с.
35. Зиангиров, Р.С. Практикум по механике грунтов / Р.С. Зиангиров, П.Э.Роот,

С.Д. Филимонов -М.: изд-во МГУ, 1984. - 152 с.

36. Золотарь, А.И. О совершенствовании методики компрессионных испытаний оттаивающих грунтов / А.И.Золотарь, Д.Р. Шейнкман // Труды института ВНИИОСП им. Н.М. Герсевича - 1990. - вып. 91- с. 82-85.

37. Зотов, М.Ю. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечномерзлых грунтах / М.Ю.Зотов, И.В.Ушаков, И.Л. Димов, А.О Олейникова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов- 2012. - № 2 - с.61-65

38. Кальбергенов, Р.Г. Современные методы исследования механических свойств оттаивающих / Р.Г.Кальбергенов, А.Р. Леонов // Промышленное и гражданское строительство – 2003 - №10 - С. 22-23

39. Караулова, З.М. Коэффициент вязкости глинистых грунтов и его значение при прогнозе длительной деформации смещения подпорных сооружений / З.М. Караулова // Труды первого Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. Ереван: изд-во Ереванского университета – 1973 - с 213-221

40. Карлов, В.Д. Новые методы оценки влияния промерзания и оттаивания на изменение механических свойств сезоннопромерзающих грунтов оснований сооружений / В.Д. Карлов // Инженерно-геологические изыскания и исследования в криолитозоне – теория, методология, практика. СПб.- 2000, - с.124-130.

41. Квеско, Н.Г. Методы и средства исследований: учебное пособие / Н.Г. Квеско, П.С. Чубик - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 112 с.

42. Киселев, М.Ф. Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением/ М.Ф. Киселев - Л., Стройиздат, 1978. - 176 с.

43. Колесов, А.А. Некоторые результаты исследований осадки оттаивающих вечномерзлых песков на севере Западной Сибири / А.А. Колесов, М.А. Минкин, Н.А Шилин // Труды института ВНИИОСП им. Н.М. Герсевича -1990.- вып. 91- с. 48-61.

44. Клинова, Г.И. Определение деформативных свойств мерзлых грунтов при

- оттаивании / Г.И. Клинова, В.И. Аксенов, Н.И. Джахангирова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2010-№3 - с.21-25
45. Комаров, И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. — Москва: Научный мир, 2003. — с. 608.
46. Котов, П.И. Обобщение деформационных характеристик оттаивающих грунтов / П.И. Котов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013-№3 - с.23-26
47. Кроник, Я.А. Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений методом конечных элементов / Я.А. Кроник, И.И. Демин - М.: МИСИ, 1982. – 102с.
48. Кроник, Я.А. Термомеханические модели мерзлых грунтов и криогенных процессов. // в кн. Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М.: Наука, 1982. - с. 200-211
49. Кудрявцев, С.А. Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания морозоопасных грунтов / Кудрявцев, С.А. - СПб.: АСВ, 2004. – 37с.
50. Лапкин, Г.И. Расчет осадок сооружений на оттаивающих вечномерзлых грунтах на основе опытов с естественными образцами, проведенных в лабораторных условиях / Г.И. Лапкин - Бюл. Союзтранспроект, 1938, №12. 12 с.
51. Малышев, М.В. Расчет осадки фундаментов на оттаивающем грунте / М.В. Малышев // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1966 - №4.- с.20-24.
52. Маслов, Н.Н. Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных стенок/ Н.Н. Маслов - М.: Энергия, 1968 – 160 с.
53. Методические рекомендации по определению физико-механических свойств вечномерзлых глинистых и песчаных грунтов в полевых условиях. М. : ЦНИИС, 1987 – 64 с.
54. Методы геокриологических исследований: учеб. пособие / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 2004 – 512 с.
55. Миронов, Э.Г. Средства и Методы измерений / Э.Г. Миронов - Е.: Изд. ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009. - 462 с.
56. Основы геокриологии. Часть 1. Физико-химические основы геокриологии /

под ред. Ершова Э.Д. М.: Изд-во МГУ, 1995.- 368 с.

57. Парамонов, В.Н. Процессы промерзания и оттаивания при устройстве подземных и заглубленных сооружений / В.Н.Парамонов, И.И. Сахаров, М.В. Парамонов // Жилищное строительство. – 2012. – №9. – С.21-23.

58. Пахомова, Г.М. Осадки оттаивающих грунтов в процессе консолидации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Пахомова Галина Михайловна - М., 1980. -24с.

59. Пономарев, В.Д. Проблемы механики оттаивающих грунтов и пути их решения / В.Д. Пономарев // Оттаивающие грунты как основание сооружений М.: Наука - 1981.-с. 5-13.

60. Пономарев, В.Д. Пути совершенствования испытаний вечномерзлых грунтов горячими штампами / В.Д. Пономарев // Труды института ВНИИОСП им. Н.М. Герсевича 1990.- вып. 91- С. 3-36.

61. Порхаев, Г.В., К вопросу об экспериментальных методах определения осадки многолетнемерзлых дисперсных грунтов. / Г.В. Порхаев, С.Г.Цветкова // Труды Ин-та Мерзлотоведения, М: Изд-во АН СССР - 1958. -т. XIV- с.64-69

62. Порхаев, Г.В. Некоторые данные о коэффициенте фильтрации оттаявших грунтов / Г.В. Порхаев // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР-1961. - 6 с.

63. Порхаев, Г.В. Исследование и расчет оттаивания, осадки, порового давления и устойчивости оттаивающего основания правобережной плотины Хантайской ГЭС / Г.В. Порхаев // М.: НИИОСП, 1970. - 134 с.

64. Потрашков, Т.П. О влиянии текстуры оттаявших глинистых грунтов на их прочность и фильтрационные свойства/ Т.П.Потрашков, Л.Н. Хрусталева - Изд-во СО АН СССР, 1961. - 8 с.

65. Пчелинцев, А.М. Прогноз осадки при оттаивании вечномерзлых грунтов / А.М. Пчелинцев // Труды Игарской мерзлотной станции. М.: Изд-во АН СССР-1954. - с.7-21.

66. Пчелинцев, А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов / А.М. Пчелинцев - М.: Наука, 1964.- 260 с.

67. Роман, Л.Т. Механика мерзлых грунтов. / Л.Т. Роман - М.: МАИК "Наука / Интерпериодика", 2002. - 426 с.
68. Роман, Л. Т. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне / Л. Т. Роман, А. А. Цернант, В. Л. Полещук, А. Н. Цеева, Н. И.Леванов - М.: Изд-во "Эст", 2008. - 323 с.
69. Роман, Л.Т. Вязкость мерзлых грунтов / Л.Т.Роман, П.И. Котов // Криосфера Земли – 2013- 4 – 30-35 с.
70. Сорокин, В.А. О достоверности результатов лабораторных компрессионных испытаний грунтов на сжимаемость при оттаивании / В.А. Сорокин // Оттаивающие грунты как основание сооружений М.: Наука, 1981.-с. 5-13.
71. Сорокин, В.А. О корреляции результатов штамповых и компрессионных испытаний мерзлых грунтов при оттаивании / В.А. Сорокин, Ю.Г. Федосеев // Основания, фундаменты и механика грунтов 1989 - №4 - с. 19
72. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах - М.: ФЦС, 2012. - 52с.
73. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спирин, В.В. Лавров - Е.: Изд. ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. - 257 с.
74. Трофимов, В.Т., Грунтоведение / В.Т.Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский, Г.А. Голодковская, Ю.К. Васильчук, Р.С. Зиангиров; год ред. В.Т.Трофимова. - М.: Изд-во МГУ, 2005. - 1024 с.
75. Ушкалов, В.П. Исследование работы протаивающих оснований и их расчет по предельным деформациям сооружений / Ушкалов В.П. -М.: Изд-во АН СССР, 1962.- 220 с.
76. Ушкалов, В.П. Основные закономерности сжимаемости оттаивающих и оттаявших под давлением грунтов /Ушкалов В.П. // Материалы VIII Всесоюз. Совец. по геокриологии. Якутск, 1966. С. 226-237.
77. Федосеев, Ю.Г. Экспериментальные исследования осадки оттаивающих грунтов / Федосеев Ю.Г. // Оттаивающие грунты как основание сооружений М.: Наука - 1981.- с. 60-68.

78. Федосов, А.Е. Физико-механические процессы в грунтах при их промерзании и оттаивании / А.Е. Федосов - М.: Трансжелдориздат, 1935. - 48 с.
79. Фельдман, Г.М. Решение одномерной задачи консолидации оттаивающих грунтов с учетом переменной проницаемости и сжимаемости / Фельдман Г.М. // Материалы VIII Всесоюз. совещ. по геокриологии. Якутск – 1966.- вып. 5.- с. 185-191.
80. Хилимонюк, В.З. Особенности компрессионного деформирования дисперсных пород оттаявших в разных температурных режимах: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.07 / Хилимонюк Ванда Здиславовна - М., 1988. - 17 с.
81. Хилимонюк, В.З. Особенности компрессионного сжатия грунтов, оттаивавших при различных температурных режимах / В.З. Хилимонюк // Труды СО НИИОСП Сыктывкар - 1986–.Вып.5 - с.62-67
82. Хрусталеv, Л.Н. Фильтрационные свойства сезоннооттаивающих глиистых грунтов района Воркуты / Хрусталеv Л.Н.// Материалы к основам изучения о мерзлых зонах земной коры. М.: Изд-во АН СССР, - 1961.- с.157-163.
83. Хрусталеv, Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне / Хрусталеv Л.Н - М.: Изд-во МГУ, 2005. - 542 с.
84. Царапов, М.Н. Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.08 / Царапов Михаил Николаевич - М., 2008. - 21 с.
85. Царапов, М.Н. Физические и механические свойства мерзлых грунтов при оттаивании / М.Н. Царапов, П.И. Котов // Путь и путевое хозяйство – 2013 – 9 - с.
86. Цытович, Н.А. К расчету осадок фундаментов на оттаивающих грунтах / Н.А. Цытович // Труды ЛИСИ.- 1941. -вып. 3
87. Цытович, Н.А. Исследования консолидации оттаивающих льдонасыщенных грунтов / Н.А. Цытович, В.Г. Григорьева, Ю.К. Зарецкий //Труды ВНИИОСП. - 1966. - №56.- с.34-52.
88. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович - М.: Высшая школа, 1973.- 446 с.
89. Чеверев, В.Г. Природа криогенных свойств грунтов / В.Г. Чеверев. – М.:

Научный мир, 2004. – 234с.

90. Шушерина, Е.П. Изменение физико-механических свойств грунтов в результате промерзания и последующего оттаивания / Е.П. Шушерина // Материалы по физике и механике мерзлых грунтов. – М., 1959. – С.99-114.
91. Alkire, B. D. Comparative response of soils to freeze–thaw and repeated loading. SpecialReport / B. D. Alkire, J. A. Morrison // United States Army , Cold Regions Research and Engineering laboratory, Hanover ,New Hampshire, USA. – 1983. - p. 89–95.
92. Andersland, O.B. Frozen Ground Engineering / O.B. Andersland, B.Ladanyi - co-Published by American Society of Civil Engineers and John Wiley & Sons, 2004 – 363 p.
93. Anderson, D.M. Physics, chemistry, and mechanics of frozen ground: a review / D.M. Anderson, N.R. Morgenstern // II Int. Conf. on. Permafrost. Yakutsk - 1973. - p.257-288
94. Bolton, W.R. Estimation of hydraulic properties in permafrost-affected soils using a two-directional freeze-thaw algorithm / W.R. Bolton, J. Boike, P.P. Overduin // 9 Int. Conf. on. Permafrost. Fairbanks - 2008 -.p 155-158
95. Chamberlain, E. J. Effect of freezing and thawing on permeability and structure of soils / E. J. Chamberlain, A. J. Gow. // Engineering Geology, 1979.- 13:- p. 73-92.
96. Chamberlain, E.J. Freeze –thaw effects on clay covers and liners / E.J. Chamberlain, M. Ayorinde, O.A. Ayorinde.// Cold Regions: 6th Int. Speciality Conf. TCCP/ASCE, West Lebanon, NH, USA. - 1991. - p.136–151.
97. Chamberlain, E.J. Freeze–thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonite barriers / E.J. Chamberlain, I. Iskandar, S. H. Kraus, C.H. Benson, A.E. Erickson // Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 1997 - 123(3):- p. 229–238.
98. Cheng E., Jiang H. Thaw settlement of frozen subsoils in seasonal frost regions / E. Cheng, H. Jiang // 5th International Conference on Permafrost, Trondheim – 1988- Vol 2. – p. 1051-1055
99. Cheng, Y. Thaw settlement behavior of permafrost along an oil pipeline to be constructed in northeastern China / Y. Cheng, Z. Wen, G. Li, J. Hao, W.Wu // 9 Int.

Conf. on. Permafrost. Fairbanks - 2008 - p 1639-1643

100. Czurda, K.A. Influence of freezing and thawing on the permeability of clay barriers. / K.A. Czurda, S. Ludwig, //7th Euroclay Conf, Dresden.- 1991 - p. 255–260.

101. Crory, F: Settlement associated with the thawing of permafrost/ F: Crory //2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk. – 1973-p.599-607

102. Eigenbrod, K. D. Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils / K. D. Eigenbrod, S. Knutsson, D. Sheng //Cold Regions Engineering. – 1996-Vol. 10, No. 2, - p. 77-92.

103. Harris, C. Laboratory simulation of periglacial solifluction: significance of porewater pressure, moisture contents and undrained shear strengths during soil thawing / C. Harris, M. C. R. Davies, J.-P. Coutard // Permafrost and periglacial processes – 1995 - Vol. 6 (4) - p. 293-311.

104. Harris, C. Scaled physical modelling of mass movement processes on thawing slopes / C. Harris, B. Rea, M. Davies // Permafrost and Periglacial Processes - 2001- 12 (1). - p.125-136

105. Hazirbaba, K. Evaluation of temperature and freeze–thaw effects on excess pore pressure generation of fine-grained soils/ K. Hazirbaba, Yu. Zhang, J. L. Hulsey // Soil Dynamics and Earthquake Engineering - 2011 – 31 - p. 372–384

106. Hohmann-Porebska, M. Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters / M. Hohmann-Porebska// Clay Science – 2002 – 21 - p.77– 87

107. Ishikawa T., Miura S. Numerical modeling for mechanical behavior of granular materials subjected to freeze-thaw action with DEM / T. Ishikawa, S. Miura // 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), India – 2008 - p 1219-1226

108. Konard, J-M Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation/ J-M. Konard, M. Samson //Canadian Geotechnical Journal. – 2000 – 37- p. 857-869

109. Kotov, P.I. Impact of thawing on soil deformation / P.I. Kotov // Tenth International Conference on Permafrost, Salekhard. - 2012 - vol 2 - p. 199-205

110. Kudryavtsev, S.A. Numerical forecast of freezing, heave and thawing of soils

under footings in three-dimensional mode / Kudryavtsev S.A, Sakharov I.I., Paramonov V.N // Proceeding of the fifth International symposium on permafrost engineering. Vol.1. – Yakutsk: Permafrost Institute Press, 2002. – P.198-202.

111. Luscher, U. Thaw consolidation of Alaskan silts and granular soils/ U.Luscher, S.S.Afifi //2nd Int. Conf. on. Permafrost. Yakutsk, - 1973 - p.325-334

112. McRoberts, E.C. Thaw consolidation effects in degrading permafrost / E.C. McRoberts, E.B.Fletcher, J. F Nixon//3 Int. Conf. on Permafrost, Edmonton - 1978 - p 693-699

113. McRoberts, E.C. Thaw settlement studies in the discontinuous permafrost zone / E.C. McRoberts, T.C. Law, E. Moniz //3 Int. Conf. on Permafrost, Edmonton - 1978 - p 700-707

114. Morgenstern, N. R. One-dimensional consolidation of thawing soils / N. R. Morgenstern, J. F. Nixon// Canadian Geotechnical Journal. 1971. - Vol. 8. - p. 558-565.

115. Morgenstern, N. R. Thaw-consolidation tests on remoulded clays / N. R. Morgenstern, L. B. Smith // Canadian Geotechnical Journal - 1973 - Vol. 10 - p. 25-39

116. Nixon, J. F. Practical extensions to a theory of consolidation for thawing soil / J. F. Nixon, , N. R. Morgenstern //2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk - 1973 – p. 369-377

117. Oswell, J., Pore water pressure response to thawing permafrost / J. Oswell, D. Skibinsky, S.Radmard // 60th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa - 2007 - p. 2068-2075.

118. Oztas, T. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability / T. Oztas, F. Fayetorbay // Catena – 2003 – 52 – p. 1–8

119. Paudel, B. Coefficient of consolidation of the soils from the Mackenzie valley, Canada / B. Paudel, B.Wang // 62nd Canadian Geotechnical Conference & 10th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Halifax – 2009 – p. 67-73.

120. Ryde'n, C.G. Pore pressures in thawing soils/ C.G. Ryde'n // Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo– 1985- p. 223–226.

121. Saarelainen, S. Field and laboratory methods for determining properties in thawing soils / S. Saarelainen // International conference on Ground Freezing and frost

action in soils – 1997- p. 53–61.

122. Sheng, Y. Thaw settlement behavior of permafrost along an oil pipeline to be constructed in northeastern China / Y. Sheng, Z. Wen, G. Li, J. Hao, W. Wu // 9 Int. Conf. on Permafrost, Fairbanks. - 2008 - p.1639-1643

123. Smith, W.S. Sample disturbance and thaw consolidation of a deep sand permafrost / W.S. Smith, K. Nair, R.E. Smith //2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk. - 1973 - p. 325-334

124. Speer, T. L. Effects of ground-ice variability and resulting thaw settlements on buried warm-oil pipelines / T. L. Speer, G. H. Watson, R. K. Rowley //2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk. - 1973 - p.599-607

125. Tsyтович, N.A. Interrelationship of the principal physicommechanical and thermophysical properties of coarse-grained frozen soil / N.A.Tsyтович, J.A. Kronik // Eng. Geol. – 1979 - № 13, p. 163-167

126. Qi, J. Influence of freeze–thaw on engineering properties of a silty soil / J. Qi, W. Ma, C Song // Cold Regions Science and Technology. – 2008- 53 - p.397–404.

127. Van Vliet-Lanoe, B. Development of soil fabric by freeze/thaw cycles—its effect on frost heave / B.Van Vliet-Lanoe, A. Dupas // 7th Int. Symp. Ground Freezing. Rotterdam.- 1991- p. 189–195.

128. Viklander, P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw / P. Viklander //Canadian Geotechnical Journal. - 1998 - 35(3) – p. 471-477.

129. Wang, D. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay/ D. Wang, W. Ma, , Y.H. Niu, X.X. Chang, , Z. Wen // Cold Regions Science and Technology. - 2007 – 48 - p. 34–43.

130. Watson, G.H. Determination of some frozen and thawed properties of permafrost soils / G.H. Watson, W.A. Slusarchuk, R.K. Rowley // Canadian Geotechnical Journal – 1973 - v. 10, no. 4 - p. 592-606

131. White, T.L. Cryogenic alteration of frost susceptible soils / T.L White, P.J. Williams // Int. Symp. on Ground Freezing, Beijing – 1994 - p. 189– 195.

132. Xu, J. Permafrost thawing-pipeline interaction advanced finite element model / J. Xu, B.Abdalla, A. Eltaher, P. Jukes // ASME 28th International on Ocean, Offshore and

Arctic Engineering, Hawaii – 2009 - p1-6

133. Zou Y. Compressibility of fine-grained soils subjected to closed-system freezing and thaw consolidation/ Y. Zou, C. Boley // Mining Science and Technology -2009 - 19 - p. 631-635

Приложение

Показатели плотности, влажности, пластичности и деформационные
характеристики исследуемых грунтов

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _l , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
1. Таз-Енисейская область									
1	2	песок пылеватый	1,98	0,18				0,050	0,028
2	2	песок пылеватый	1,86	0,18				0,087	0,035
3	3	песок пылеватый	2,05	0,17				0,076	0,023
4	3	песок пылеватый	1,99	0,19				0,055	0,043
5	3	песок пылеватый	2,01	0,17				0,051	0,022
6	1	песок пылеватый	1,91	0,25				0,109	0,045
7	3	песок пылеватый	1,94	0,21				0,061	0,042
8	3	песок пылеватый	1,94	0,21				0,080	0,039
9	3	песок пылеватый	1,91	0,26				0,115	0,038
10	3	песок пылеватый	1,91	0,20				0,095	0,045
11	3	песок пылеватый	1,88	0,25				0,095	0,051
12	3	песок пылеватый	1,95	0,23				0,091	0,033
13	3	песок пылеватый	1,91	0,25				0,084	0,034
14	3	песок пылеватый	1,99	0,22				0,083	0,034
15	3	песок пылеватый	1,99	0,21				0,074	0,038
16	3	песок пылеватый	1,93	0,23				0,096	0,032
17	1,5	суглинок	1,55	0,45	0,28	0,20	0,081	0,328	0,192
18	1	суглинок	1,86	0,24	0,30	0,17	0,131	0,132	0,158
19	1	суглинок	1,52	0,42	0,28	0,19	0,087	0,311	0,145
20	3	суглинок	1,68	0,29	0,31	0,21	0,092	0,155	0,119
21	2	суглинок	1,61	0,36	0,22	0,14	0,079	0,290	0,205
22	1	суглинок	1,52	0,56	0,29	0,18	0,103	0,307	0,138
23	2	суглинок	1,62	0,59	0,29	0,18	0,103	0,209	0,160
24	3	суглинок	1,63	0,35	0,32	0,22	0,100	0,105	0,180
25	2	суглинок	1,63	0,34	0,30	0,20	0,102	0,091	0,149
26	2	суглинок	1,63	0,63	0,35	0,19	0,154	0,272	0,125
27	3	суглинок	1,69	0,46	0,35	0,19	0,154	0,154	0,121
28	1	суглинок	1,61	0,63	0,24	0,14	0,097	0,241	0,064
29	2,5	суглинок	1,55	0,46	0,25	0,14	0,103	0,311	0,080
30	3	суглинок	1,87	0,24	0,33	0,21	0,120	0,036	0,064
31	2	суглинок	1,52	0,56	0,33	0,21	0,120	0,153	0,131
32	3	суглинок	1,57	0,40	0,29	0,22	0,076	0,194	0,172
33	2	суглинок	1,57	0,38	0,29	0,21	0,085	0,246	0,245
34	2,2	суглинок	1,89	0,31	0,30	0,17	0,130	0,149	0,148
35	1	суглинок	1,90	0,31	0,28	0,15	0,126	0,168	0,193
36	2	суглинок	1,57	0,55	0,28	0,18	0,098	0,167	0,111
37	2	суглинок	1,56	0,59	0,31	0,20	0,115	0,301	0,126
38	2	суглинок	1,74	0,37	0,24	0,14	0,097	0,167	0,152
39	1	суглинок	1,54	0,54	0,25	0,14	0,103	0,252	0,086
40	1,0	суглинок	1,88	0,24	0,35	0,19	0,154	0,132	0,158
41	2	суглинок	1,71	0,28	0,24	0,14	0,097	0,095	0,234
42	2,0	суглинок	1,74	0,19	0,25	0,14	0,103	0,116	0,229
43	3,0	суглинок	1,68	0,29	0,30	0,19	0,113	0,111	0,119

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
44	2,0	суглинок	1,80	0,35	0,33	0,21	0,120	0,155	0,064
45	3,0	суглинок	1,67	0,30	0,29	0,22	0,076	0,089	0,082
46	2	суглинок	1,52	0,36	0,34	0,18	0,156	0,197	0,205
47	2	суглинок	1,68	0,59	0,29	0,21	0,085	0,210	0,160
48	3,0	суглинок	1,73	0,35	0,28	0,17	0,107	0,209	0,180
49	2,0	суглинок	1,73	0,34	0,30	0,17	0,130	0,245	0,149
50	3,0	суглинок	1,69	0,45	0,28	0,15	0,126	0,105	0,121
51	1,0	суглинок	1,75	0,56	0,29	0,19	0,103	0,247	0,131
52	2,5	суглинок	1,74	0,40	0,28	0,18	0,098	0,154	0,173
53	2,0	суглинок	1,75	0,36	0,28	0,18	0,100	0,153	0,245
54	3,0	суглинок	1,83	0,31	0,31	0,20	0,115	0,194	0,148
55	1	суглинок	1,81	0,31	0,45	0,35	0,101	0,246	0,194
56	1,0	суглинок	1,81	0,55	0,21	0,12	0,091	0,149	0,171
57	1	суглинок	1,65	0,26	0,26	0,17	0,087	0,168	0,264
58	2,0	суглинок	1,67	0,37	0,28	0,18	0,093	0,286	0,267
59	2,0	суглинок	1,52	0,57	0,31	0,20	0,117	0,315	0,288
60	1	суглинок	1,91	0,18	0,23	0,15	0,088	0,154	0,060
61	1	суглинок	1,96	0,25	0,21	0,18	0,022	0,128	0,125
62	2,0	суглинок	1,85	0,29	0,25	0,21	0,043	0,129	0,179
63	2	суглинок	1,82	0,25	0,15	0,10	0,053	0,046	0,060
64	2	суглинок	1,82	0,23	0,25	0,19	0,061	0,172	0,125
65	3,0	суглинок	1,84	0,23	0,24	0,17	0,070	0,096	0,155
66	2,0	суглинок	1,68	0,26	0,18	0,12	0,060	0,046	0,229
67	3,0	суглинок	1,71	0,18	0,29	0,22	0,069	0,096	0,206
68	2	суглинок	1,65	0,28	0,26	0,19	0,069	0,119	0,117
69	2	суглинок	1,76	0,33	0,27	0,17	0,041	0,085	0,063
70	1,0	супесь	1,76	0,32	0,24	0,17	0,060	0,116	0,011
71	2	супесь	1,56	0,53	0,18	0,12	0,060	0,284	0,015
72	2,0	супесь	1,82	0,30	0,26	0,19	0,060	0,044	0,059
73	3,0	супесь	1,67	0,18	0,17	0,13	0,041	0,182	0,053
74	1	супесь	1,52	0,42	0,20	0,14	0,053	0,187	0,198
75	2,0	супесь	1,65	0,35	0,29	0,24	0,051	0,103	0,094
76	3,0	супесь	1,72	0,21	0,20	0,14	0,053	0,261	0,177
77	2	супесь	1,74	0,35	0,25	0,17	0,060	0,186	0,108
78	2	супесь	1,85	0,22	0,17	0,13	0,041	0,184	0,037
79	2	супесь	1,58	0,34	0,27	0,22	0,056	0,045	0,092
80	3,0	супесь	1,56	0,23	0,17	0,13	0,045	0,136	0,057
81	2,0	супесь	1,54	0,34	0,19	0,15	0,040	0,284	0,114
82	3,0	супесь	1,84	0,25	0,19	0,15	0,040	0,175	0,179
83	1,0	супесь	1,82	0,38	0,19	0,14	0,051	0,185	0,157
84	2,5	супесь	1,97	0,20	0,19	0,14	0,051	0,109	0,045
85	2,0	супесь	1,93	0,28	0,25	0,19	0,058	0,061	0,042
86	3,0	супесь	1,77	0,27	0,19	0,16	0,034	0,080	0,039
87	1	супесь	1,94	0,21	0,18	0,12	0,060	0,119	0,038

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
88	3,0	супесь	1,94	0,21	0,26	0,19	0,060	0,095	0,045
89	3,0	супесь	1,91	0,26	0,17	0,13	0,041	0,095	0,051
90	3,0	супесь	1,91	0,20	0,20	0,14	0,053	0,091	0,033
91	2,0	супесь	1,88	0,25	0,29	0,24	0,051	0,084	0,034
92	3,0	супесь	1,95	0,23	0,20	0,14	0,053	0,083	0,034
93	3,0	супесь	1,91	0,25	0,25	0,17	0,060	0,074	0,038
94	3,0	супесь	1,99	0,22	0,17	0,13	0,045	0,096	0,032
95	3,0	супесь	1,99	0,21	0,19	0,15	0,040	0,099	0,044
96	3,0	супесь	1,93	0,23	0,19	0,15	0,040	0,098	0,040
2. Район Ванкорской возвышенности									
1	5	песок мелкий	1,98	0,18				0,026	0,106
2	6	песок мелкий	1,86	0,18				0,037	0,062
3	8	песок мелкий	1,83	0,45				0,032	0,054
4	6,8	песок мелкий	1,79	0,19				0,038	0,037
5	9	песок мелкий	1,81	0,25				0,035	0,029
6	4,5-4,8	песок мелкий	1,86	0,20				0,040	0,035
7	7,0-7,5	песок мелкий	1,83	0,25				0,102	0,083
8	3,4-3,5	песок мелкий	1,95	0,23				0,060	0,040
9	7,0-7,2	песок мелкий	1,81	0,25				0,013	0,086
10	6,0-6,2	песок мелкий	1,99	0,22				0,045	0,105
11	5,0-5,2	песок мелкий	1,79	0,21				0,056	0,040
12	6,0-6,1	песок мелкий	1,93	0,23				0,031	0,030
13	9,5	супесь	2,02	0,19	0,29	0,23	0,060	0,050	0,017
14	3	супесь	2,15	0,15	0,28	0,25	0,033	0,026	0,045
15	5,3	супесь	1,76	0,27	0,27	0,21	0,057	0,136	0,048
16	2,2	супесь	1,69	0,47	0,35	0,28	0,060	0,208	0,031
17	4,0-4,1	супесь	1,70	0,40	0,27	0,21	0,061	0,148	0,195
18	3,0-3,2	супесь	1,78	0,40	0,21	0,18	0,029	0,109	0,095
19	3,2-3,4	супесь	1,86	0,38	0,20	0,17	0,032	0,102	0,043
20	2,5-2,7	супесь	1,95	0,26	0,24	0,21	0,027	0,076	0,094
21	2,0-2,2	супесь	1,99	0,25	0,26	0,20	0,067	0,076	0,104
22	4,0-4,2	супесь	1,95	0,25	0,22	0,17	0,053	0,048	0,042
23	5,0-5,2	супесь	1,96	0,24	0,22	0,17	0,055	0,064	0,023
24	4,0-4,2	супесь	1,99	0,28	0,26	0,21	0,045	0,085	0,062
25	6,0-6,2	супесь	1,71	0,31	0,24	0,17	0,069	0,093	0,183
26	6,5-7,0	суглинок	0,36	1,72	0,31	0,24	0,078	0,037	0,012
27	2,8-3,0	суглинок	0,43	1,78	0,27	0,19	0,086	0,092	0,195
28	4,7-4,8	суглинок	0,53	1,61	0,51	0,38	0,136	0,064	0,030
29	4,0-4,2	суглинок	0,45	1,67	0,51	0,36	0,156	0,102	0,092
30	4,0-4,2	суглинок	0,42	1,67	0,31	0,23	0,084	0,038	0,012
31	1,8-2,0	суглинок	0,51	1,69	0,46	0,31	0,151	0,093	0,363
32	1,5-1,6	суглинок	0,91	1,61	0,52	0,38	0,142	0,304	0,131
33	2,0-2,2	суглинок	0,36	1,74	0,28	0,21	0,071	0,065	0,310
34	5,0-5,2	суглинок	0,32	1,84	0,34	0,25	0,094	0,033	0,055

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
35	5,0-5,1	суглинок	0,47	1,70	0,38	0,30	0,084	0,110	0,098
36	4,0-4,2	суглинок	0,37	1,70	0,34	0,20	0,139	0,111	0,160
37	4,0-4,2	суглинок	0,28	1,99	0,28	0,19	0,082	0,085	0,062
38	6,0-6,2	суглинок	0,56	1,65	0,45	0,30	0,153	0,141	0,171
39	6,0-6,2	суглинок	0,49	1,74	0,32	0,22	0,102	0,095	0,037
40	6,0-6,2	суглинок	0,35	2,01	0,30	0,20	0,095	0,058	0,007
41	6,0-6,2	суглинок	0,31	1,71	0,26	0,17	0,095	0,093	0,183
42	5,0-5,2	суглинок	0,37	1,80	0,30	0,22	0,076	0,111	0,107
43	2	суглинок	0,61	1,50	0,35	0,25	0,101	0,169	0,170
44	4,5	суглинок	0,15	1,61	0,37	0,27	0,100	0,250	0,119
45	8	суглинок	0,56	1,63	0,43	0,30	0,130	0,159	0,328
46	8,5	суглинок	0,50	1,82	0,43	0,30	0,130	0,086	0,097
47	2,5	суглинок	0,42	1,76	0,30	0,21	0,085	0,263	0,135
48	4	суглинок	0,36	1,69	0,27	0,18	0,086	0,312	0,214
49	1,7	суглинок	0,26	1,86	0,32	0,18	0,143	0,151	0,153
50	10	суглинок	0,27	2,01	0,34	0,22	0,119	0,079	0,079
51	3	суглинок	0,15	2,15	0,29	0,21	0,081	0,026	0,045
52	5,3	суглинок	0,27	1,76	0,25	0,18	0,072	0,136	0,048
53	2,2	суглинок	0,47	1,69	0,25	0,18	0,072	0,208	0,031
54	4,8	суглинок	0,38	1,91	0,25	0,18	0,073	0,076	0,059
3. Район вблизи г. Анадырь									
1	4	суглинок	1,61	0,36	0,25	0,34	0,091	0,082	0,224
2	7,7	суглинок	1,60	0,46	0,26	0,36	0,095	0,035	0,041
3	6,4	суглинок	1,56	0,35	0,26	0,36	0,095	0,142	0,119
4	6,2	суглинок	1,79	0,33	0,23	0,31	0,073	0,086	0,202
5	9	суглинок	1,57	0,38	0,28	0,37	0,098	0,132	0,522
6	6,6	суглинок	1,97	0,23	0,19	0,27	0,078	0,005	0,076
7	2,9	суглинок	1,60	0,38	0,22	0,31	0,086	0,014	0,067
8	4,3	суглинок	1,75	0,26	0,19	0,26	0,071	0,035	0,246
9	2,5	суглинок	1,71	0,32	0,22	0,30	0,075	0,185	0,039
10	7,9	суглинок	1,84	0,34	0,25	0,33	0,084	0,132	0,078
11	8	супесь	1,86	0,15	0,18	0,23	0,058	0,019	0,112
12	3,9	супесь	1,61	0,32	0,22	0,26	0,049	0,007	0,064
13	5,9	супесь	1,73	0,21	0,17	0,20	0,035	0,083	0,106
14	8,8	супесь	1,89	0,28	0,20	0,24	0,042	0,001	0,064
15	2,3	супесь	1,81	0,27	0,20	0,26	0,054	0,020	0,090
16	3,1	супесь	1,88	0,22	0,16	0,21	0,051	0,007	0,064
4. Харасавэй									
1	5,5	глина	1,63	0,40	0,47	0,27	0,200	0,205	0,231
2	5,5	глина	1,55	0,54	0,36	0,22	0,139	0,255	0,181
3	2,5	глина	1,84	0,41	0,46	0,27	0,191	0,048	0,407
4	2,5	глина	2,02	0,23	0,44	0,25	0,189	0,015	0,186
5	2,5	глина	1,85	0,41	0,51	0,27	0,233	0,036	0,196
6	5,5	глина	1,68	0,31	0,48	0,30	0,181	0,041	0,789

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
7	5,5	глина	1,87	0,36	0,46	0,27	0,189	0,071	0,209
8	5,5	глина	1,49	0,51	0,46	0,27	0,189	0,152	0,262
9	2,5	глина	1,67	0,44	0,49	0,27	0,217	0,078	0,302
10	2,5	глина	1,66	0,34	0,42	0,24	0,187	0,015	0,269
11	5,5	глина	1,79	0,29	0,48	0,26	0,226	0,095	0,229
12	4,5	глина	1,66	0,45	0,48	0,26	0,214	0,098	0,354
13	5,5	глина	1,79	0,43	0,48	0,26	0,226	0,140	0,181
14	5	глина	1,76	0,40	0,51	0,32	0,195	0,167	0,243
15	5,5	глина	1,57	0,46	0,45	0,27	0,183	0,040	0,953
16	2,5	глина	1,62	0,46	0,46	0,28	0,183	0,079	0,456
17	2,5	глина	1,60	0,46	0,48	0,26	0,214	0,132	0,490
18	5,5	суглинок	1,76	0,38	0,51	0,34	0,165	0,035	0,417
19	5,5	суглинок	1,85	0,31	0,34	0,20	0,137	0,022	0,177
20	2,5	суглинок	1,71	0,38	0,46	0,34	0,115	0,085	0,241
21	2,5	суглинок	1,74	0,37	0,40	0,24	0,162	0,018	0,192
22	5,5	суглинок	1,81	0,33	0,30	0,22	0,081	0,025	0,070
23	2,5	суглинок	1,68	0,42	0,39	0,24	0,147	0,029	0,269
24	5,5	суглинок	1,66	0,38	0,37	0,21	0,159	0,181	0,153
25	2,5	суглинок	1,76	0,46	0,41	0,26	0,146	0,041	0,235
26	5,5	суглинок	1,86	0,18	0,28	0,19	0,091	0,023	0,234
27	2,5	суглинок	1,60	0,35	0,31	0,21	0,095	0,160	0,265
28	2,5	суглинок	1,59	0,36	0,41	0,25	0,155	0,126	0,458
29	5,5	суглинок	1,77	0,54	0,43	0,26	0,168	0,141	0,153
30	5,5	суглинок	1,98	0,23	0,33	0,19	0,137	0,013	0,067
31	2,5	суглинок	1,72	0,37	0,31	0,19	0,126	0,162	0,230
32	5,5	суглинок	1,56	0,43	0,38	0,22	0,160	0,212	0,217
33	5,5	супесь	1,73	0,27	0,21	0,15	0,055	0,118	0,163
34	5,5	супесь	1,98	0,21	0,19	0,16	0,027	0,060	0,054
35	2,5	супесь	1,68	0,42	0,25	0,20	0,054	0,099	0,124
36	5,5	супесь	1,96	0,26	0,25	0,21	0,036	0,034	0,071
37	2,5	супесь	1,69	0,26	0,28	0,24	0,040	0,046	0,213
38	2,5	супесь	1,84	0,30	0,21	0,18	0,035	0,015	0,084
39	2,5	супесь	1,82	0,27	0,25	0,20	0,046	0,019	0,140
40	6	супесь	2,02	0,19	0,22	0,18	0,038	0,032	0,066
41	2,5	супесь	1,68	0,57	0,27	0,22	0,049	0,114	0,203
42	2,5	супесь	1,91	0,21	0,20	0,17	0,024	0,017	0,262
43	2,5	супесь	1,74	0,26	0,24	0,17	0,063	0,024	0,205
44	5,5	супесь	1,91	0,23	0,24	0,20	0,043	0,047	0,048
45	5,5	супесь	1,86	0,28	0,29	0,24	0,054	0,031	0,047
5. Бованенковково									
1	1,7-1,9	суглинок	1,49	0,70	0,30	0,20	0,094	0,364	0,175
2	3,2-3,4	суглинок	1,58	0,56	0,39	0,24	0,155	0,239	0,227
3	3,6-3,9	суглинок	1,51	0,64	0,41	0,27	0,135	0,350	0,130
4	4,3-4,9	суглинок	1,30	0,82	0,34	0,21	0,137	0,330	0,349

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
5	4,3-4,9	суглинок	1,51	0,66	0,34	0,21	0,137	0,262	0,255
6	2,7	суглинок	1,40	0,71	0,45	0,31	0,138	0,104	0,174
7	2,3	суглинок	1,10	1,46	0,44	0,33	0,111	0,472	0,208
8	4,1	суглинок	1,51	0,43	0,48	0,36	0,123	0,123	0,174
9	2,8	суглинок	1,19	1,12	0,39	0,31	0,076	0,244	0,230
10	3,9	суглинок	1,19	1,40	0,42	0,31	0,108	0,175	0,510
11	3,5	суглинок	1,32	0,99	0,39	0,29	0,099	0,362	0,460
12	3,3	суглинок	1,16	1,37	0,35	0,27	0,079	0,463	0,240
13	3,6	суглинок	1,34	0,99	0,31	0,24	0,075	0,361	0,460
14	1,9	суглинок	1,46	0,66	0,31	0,24	0,073	0,264	0,110
15	2,3	суглинок	1,65	0,45	0,35	0,27	0,086	0,138	0,050
16	2,3	суглинок	1,55	0,55	0,39	0,32	0,071	0,212	0,148
17	1,1	суглинок	1,26	0,87	0,43	0,34	0,092	0,458	0,098
18	2,3	суглинок	1,78	0,40	0,39	0,26	0,125	0,053	0,226
19	2,5	суглинок	1,74	0,41	0,36	0,26	0,100	0,140	0,078
20	3,1	суглинок	1,76	0,35	0,32	0,22	0,096	0,098	0,202
21	2,7-2,9	суглинок	1,52	0,67	0,29	0,21	0,077	0,351	0,134
22	3,8-3,9	суглинок	1,82	0,30	0,30	0,22	0,086	0,021	0,080
23	5,5-5,7	суглинок	1,67	0,47	0,33	0,20	0,128	0,187	0,103
24	1,6-1,8	суглинок	1,83	0,32	0,28	0,18	0,096	0,043	0,097
25	3,7-3,8	суглинок	1,83	0,30	0,30	0,22	0,086	0,063	0,071
26	4,6-4,8	суглинок	1,33	1,00	0,30	0,19	0,116	0,559	0,171
27	2,6-2,9	суглинок	1,30	1,15	0,32	0,21	0,112	0,474	0,062
28	4,3-4,5	суглинок	1,48	0,73	0,32	0,21	0,112	0,308	0,202
29	1,1-1,3	суглинок	1,68	0,38	0,28	0,20	0,077	0,166	0,263
30	3,5-3,9	суглинок	1,56	0,59	0,32	0,20	0,129	0,299	0,265
31	2,9-3,2	суглинок	1,59	0,58	0,38	0,22	0,160	0,276	0,315
32	1,8-2,2	суглинок	1,34	1,10	0,31	0,20	0,118	0,501	0,136
33	4,5-4,75	суглинок	1,77	0,36	0,40	0,27	0,134	0,117	0,263
34	4,8-5,0	суглинок	1,81	0,29	0,33	0,19	0,143	0,084	0,126
35	3,4-3,6	суглинок	1,57	0,53	0,37	0,24	0,129	0,228	0,112
36	0,9-1,2	суглинок	1,25	1,40	0,41	0,25	0,155	0,548	0,269
37	4,3-4,6	суглинок	1,30	1,08	0,35	0,21	0,141	0,529	0,236
38	3,5-3,7	суглинок	1,50	0,61	0,33	0,20	0,134	0,368	0,124
39	2,5-2,7	супесь	1,23	0,93	0,27	0,20	0,067	0,548	0,196
40	1,2-1,7	супесь	1,33	0,96	0,30	0,23	0,065	0,558	0,067
41	2,5-2,7	супесь	1,36	0,93	0,27	0,20	0,067	0,589	0,165
42	3,8-4,0	супесь	1,63	0,38	0,24	0,20	0,044	0,038	0,144
43	5,7-5,9	супесь	1,77	0,36	0,35	0,21	0,139	0,047	0,061
44	2,3-2,6	супесь	1,44	0,70	0,24	0,18	0,063	0,478	0,152
45	6,3	супесь	1,80	0,17	0,29	0,22	0,068	0,059	0,021
46	3,8	супесь	1,65	0,46	0,30	0,23	0,068	0,121	0,034
47	6	супесь	1,98	0,33	0,25	0,19	0,061	0,013	0,090
48	6,3	супесь	1,97	0,19	0,23	0,16	0,065	0,003	0,064

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
49	4,2	супесь	1,76	0,42	0,30	0,23	0,068	0,143	0,110
50	3,2	супесь	1,94	0,24	0,26	0,19	0,068	0,007	0,064
6. Юго-восточное побережье полуострова Ямал									
1	1,8	песок пылеватый	1,63	0,26				0,141	0,060
2	4	песок пылеватый	1,91	0,18				0,058	0,059
3	4,5	песок пылеватый	1,62	0,23				0,059	0,053
4	3,1	песок пылеватый	1,72	0,23				0,146	0,048
5	4,5	песок пылеватый	1,87	0,18				0,075	0,051
6	3,2	песок пылеватый	1,70	0,17				0,144	0,082
7	2,5	песок пылеватый	1,77	0,15				0,154	0,053
8	2,6	песок пылеватый	1,50	0,31				0,164	0,076
9	2,6	песок пылеватый	1,52	0,26				0,340	0,062
10	2,5	песок пылеватый	1,69	0,21				0,138	0,065
11	2,8	песок пылеватый	1,74	0,23				0,116	0,045
12	3	песок пылеватый	1,69	0,28				0,032	0,075
13	3	песок пылеватый	1,76	0,20				0,097	0,053
14	3	песок пылеватый	1,54	0,21				0,106	0,076
15	3	песок пылеватый	1,64	0,15				0,095	0,091
16	4	песок пылеватый	1,92	0,23				0,057	0,060
17	2,5	песок пылеватый	1,57	0,28				0,168	0,062
18	2,7	песок пылеватый	1,58	0,35				0,107	0,076
19	3	песок пылеватый	1,59	0,15				0,072	0,061
20	4	песок пылеватый	1,78	0,20				0,119	0,075
21	4,5	суглинок	1,41	0,61	0,41	0,25	0,158	0,544	0,264
22	2	суглинок	1,46	0,56	0,39	0,22	0,170	0,292	0,270
23	1,4	суглинок	1,36	0,36	0,33	0,21	0,116	0,261	0,151
24	1,8	суглинок	1,36	0,48	0,35	0,23	0,118	0,273	0,101
25	2,4	суглинок	1,43	0,48	0,38	0,25	0,130	0,254	0,127
26	4,5	суглинок	1,48	0,46	0,41	0,29	0,127	0,250	0,086
27	2,5	суглинок	1,41	0,34	0,39	0,29	0,098	0,041	0,114
28	2	суглинок	1,38	0,32	0,40	0,26	0,133	0,190	0,260
29	4	суглинок	1,22	0,36	0,37	0,22	0,150	0,172	0,106
30	2	суглинок	1,31	0,44	0,29	0,19	0,097	0,144	0,140
31	3	суглинок	1,42	0,36	0,29	0,19	0,098	0,198	0,134
32	3	суглинок	1,45	0,43	0,41	0,27	0,139	0,044	0,136
33	4	суглинок	1,41	0,43	0,36	0,23	0,129	0,173	0,092
34	2	суглинок	1,43	0,48	0,32	0,20	0,123	0,043	0,130
35	4,5	суглинок	1,38	0,42	0,31	0,20	0,110	0,219	0,149
36	4,5	суглинок	1,22	0,40	0,30	0,22	0,085	0,196	0,262
37	2,8	суглинок	1,72	0,29	0,23	0,14	0,086	0,289	0,089
38	3	суглинок	1,39	0,36	0,32	0,22	0,107	0,349	0,093
39	2,8	суглинок	1,42	0,72	0,28	0,18	0,103	0,345	0,325
40	4,5	суглинок	1,51	0,47	0,30	0,18	0,118	0,147	0,235
41	4,4	суглинок	1,45	1,41	0,32	0,22	0,098	0,406	0,118

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
42	2,5	суглинок	1,57	0,47	0,33	0,20	0,125	0,056	0,135
43	2,4	суглинок	1,78	0,22	0,20	0,13	0,078	0,038	0,149
44	2,1	суглинок	1,70	0,22	0,20	0,13	0,078	0,053	0,097
45	3	суглинок	1,70	0,35	0,26	0,17	0,090	0,112	0,101
46	1,5	суглинок	1,33	0,56	0,49	0,32	0,165	0,194	0,230
47	4	суглинок	1,97	0,17	0,20	0,10	0,095	0,079	0,083
48	4,4	суглинок	1,89	0,17	0,22	0,14	0,087	0,031	0,194
49	4,2	суглинок	1,63	0,32	0,29	0,19	0,103	0,126	0,199
50	3,5	суглинок	1,66	0,31	0,32	0,22	0,098	0,055	0,096
51	3,2	суглинок	1,58	0,29	0,27	0,16	0,103	0,138	0,170
52	2,7	суглинок	1,83	0,24	0,26	0,13	0,129	0,143	0,099
53	3,2	суглинок	1,39	0,34	0,30	0,22	0,088	0,228	0,098
54	3,4	суглинок	1,55	0,34	0,31	0,21	0,093	0,101	0,155
55	3	супесь	1,74	0,21	0,16	0,12	0,045	0,162	0,075
56	3,1	супесь	1,68	0,26	0,26	0,23	0,029	0,053	0,114
57	3,7	супесь	1,64	0,32	0,29	0,23	0,068	0,055	0,101
58	1,3	супесь	1,83	0,20	0,24	0,18	0,059	0,059	0,072
59	4,2	супесь	1,81	0,19	0,16	0,11	0,046	0,077	0,094
60	3,4	супесь	1,66	0,21	0,18	0,16	0,021	0,168	0,096
61	1,9	супесь	1,49	0,24	0,21	0,16	0,056	0,071	0,249
62	3,5	супесь	1,84	0,22	0,24	0,19	0,053	0,055	0,099
63	1,8	супесь	1,69	0,25	0,23	0,16	0,069	0,100	0,163
64	3	супесь	1,69	0,26	0,27	0,20	0,068	0,069	0,213
65	2,4	супесь	1,76	0,30	0,24	0,21	0,032	0,045	0,122
66	3,4	супесь	1,52	0,33	0,19	0,16	0,031	0,145	0,144
67	3,3	супесь	1,74	0,26	0,23	0,18	0,048	0,185	0,109
68	1,2	супесь	1,63	0,23	0,20	0,17	0,035	0,192	0,073
69	4,5	супесь	1,56	0,29	0,25	0,21	0,039	0,099	0,126
7. 220 км к северо-востоку от г. Усинска									
1	1,2	суглинок	2,07	0,28	0,28	0,15	0,124	0,024	0,115
2	3	суглинок	1,36	0,34	0,29	0,16	0,138	0,265	0,248
3	2	суглинок	1,74	0,33	0,30	0,19	0,117	0,149	0,373
4	1	суглинок	1,78	0,25	0,29	0,16	0,138	0,167	0,441
5	3	суглинок	2,02	0,29	0,28	0,17	0,107	0,022	0,142
6	1	суглинок	1,79	0,21	0,29	0,18	0,110	0,289	0,242
7	2	суглинок	2,05	0,28	0,26	0,15	0,112	0,011	0,122
8	1	суглинок	1,96	0,24	0,25	0,16	0,088	0,016	0,217
9	3	суглинок	1,92	0,29	0,28	0,15	0,128	0,067	0,320
10	3	суглинок	2,00	0,18	0,20	0,10	0,097	0,029	0,070
11	1	суглинок	1,99	0,18	0,29	0,15	0,141	0,022	0,132
12	1	суглинок	1,86	0,24	0,28	0,14	0,131	0,081	0,313
13	1,5-1,8	суглинок	1,83	0,33	0,27	0,18	0,087	0,166	0,486
14	1,5	суглинок	1,90	0,25	0,22	0,14	0,085	0,093	0,532
15	2,7	суглинок	1,22	0,32	0,22	0,14	0,085	0,321	0,536

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
16	2	суглинок	1,97	0,30	0,32	0,19	0,129	0,055	0,225
17	0,9	суглинок	1,84	0,18	0,22	0,13	0,088	0,068	0,669
18	1,5	суглинок	1,87	0,24	0,29	0,18	0,110	0,161	0,154
19	1,5	суглинок	1,84	0,27	0,28	0,16	0,118	0,107	0,194
20	1,6	суглинок	1,88	0,25	0,22	0,12	0,107	0,110	0,086
21	2	суглинок	1,94	0,25	0,31	0,16	0,152	0,058	0,154
22	2	суглинок	1,97	0,24	0,33	0,17	0,160	0,088	0,071
23	2,0	суглинок	1,86	0,26	0,35	0,18	0,170	0,083	0,212
24	2	суглинок	1,71	0,36	0,26	0,17	0,093	0,195	0,143
25	2,0	суглинок	1,77	0,31	0,20	0,11	0,098	0,123	0,144
26	2,0	суглинок	1,64	0,45	0,25	0,14	0,109	0,200	0,348
27	2,0	суглинок	1,71	0,35	0,20	0,12	0,080	0,232	0,175
28	2,0	суглинок	1,58	0,47	0,24	0,15	0,091	0,178	0,412
29	2,0	суглинок	1,73	0,36	0,27	0,18	0,098	0,250	0,066
30	2,0	суглинок	1,59	0,46	0,22	0,13	0,088	0,277	0,366
31	2,5	суглинок	1,76	0,31	0,27	0,18	0,088	0,172	0,182
32	2,5	суглинок	1,87	0,26	0,31	0,19	0,120	0,130	0,096
33	2,7	суглинок	1,71	0,30	0,20	0,10	0,098	0,131	0,248
34	3,0	суглинок	1,94	0,25	0,30	0,18	0,123	0,035	0,084
35	3,2	суглинок	1,75	0,32	0,20	0,11	0,098	0,155	0,106
36	3,5	суглинок	1,65	0,37	0,30	0,19	0,117	0,098	0,182
37	3,8	суглинок	1,93	0,22	0,24	0,11	0,132	0,018	0,028
38	4	суглинок	1,76	0,35	0,27	0,16	0,109	0,185	0,168
39	4	суглинок	1,63	0,36	0,30	0,16	0,139	0,100	0,194
40	4	суглинок	1,90	0,28	0,28	0,17	0,106	0,068	0,160
41	4,0	суглинок	2,06	0,22	0,21	0,13	0,081	0,026	0,081
42	4,0	суглинок	1,62	0,41	0,31	0,17	0,144	0,258	0,165
43	4,1	суглинок	2,04	0,17	0,24	0,12	0,122	0,024	0,079
44	1,5	супесь	1,91	0,19	0,20	0,17	0,029	0,022	0,077
45	1	супесь	2,01	0,20	0,21	0,17	0,037	0,009	0,140
46	2,1	супесь	2,04	0,16	0,22	0,15	0,063	0,041	0,040
47	2	супесь	1,98	0,21	0,27	0,20	0,070	0,087	0,049
48	1,4	супесь	1,94	0,23	0,21	0,15	0,063	0,020	0,076
49	2	супесь	1,97	0,22	0,18	0,15	0,036	0,048	0,071
50	1,9	супесь	2,05	0,20	0,22	0,16	0,056	0,021	0,042
51	4,0	супесь	1,89	0,26	0,19	0,14	0,049	0,103	0,163
52	2,9-3,1	супесь	1,94	0,26	0,19	0,13	0,052	0,090	0,028
53	2	песок пылеватый	1,88	0,21				0,088	0,142
54	1,5	песок пылеватый	1,92	0,20				0,007	0,032
55	2	песок пылеватый	1,73	0,32				0,181	0,032
56	2	песок пылеватый	1,93	0,20				0,021	0,039
57	5	песок пылеватый	1,97	0,20				0,010	0,036
58	2,5	песок пылеватый	1,84	0,29				0,074	0,043
59	4,5	песок пылеватый	2,05	0,19				0,039	0,027

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
60	2	песок пылеватый	1,88	0,23				0,071	0,043
61	4	песок пылеватый	1,81	0,33				0,128	0,044
62	1,2	песок пылеватый	1,98	0,18				0,049	0,067
63	2	песок пылеватый	1,96	0,24				0,090	0,055
64	3,5	песок пылеватый	1,91	0,25				0,030	0,031
65	4,5	песок пылеватый	1,89	0,26				0,082	0,028
66	3,8	песок пылеватый	1,96	0,20				0,014	0,021
67	2	песок пылеватый	1,69	0,41				0,069	0,027
8. 350 км к северо-западу от г. Усинска									
1	6	суглинок	1,96	0,16	0,23	0,10	0,13	0,052	0,050
2	3	суглинок	1,66	0,43	0,34	0,21	0,13	0,262	0,128
3	5	суглинок	1,84	0,28	0,28	0,14	0,14	0,148	0,116
4	5,5	суглинок	1,96	0,22	0,24	0,15	0,09	0,073	0,186
5	5	суглинок	1,31	0,51	0,33	0,22	0,11	0,117	0,100
6	3	суглинок	1,51	0,61	0,37	0,24	0,13	0,153	0,100
7	5,5	суглинок	1,43	0,55	0,35	0,23	0,12	0,120	0,100
8	6	суглинок	1,47	1,10	0,31	0,18	0,13	0,411	0,116
9	2,5	суглинок	1,93	0,26	0,32	0,17	0,15	0,081	0,168
10	3,5	суглинок	1,71	0,45	0,23	0,10	0,13	0,329	0,274
11	3,5	суглинок	1,76	0,34	0,23	0,10	0,13	0,240	0,044
12	5	суглинок	1,60	0,63	0,21	0,12	0,09	0,318	0,242
13	3,5	суглинок	1,74	0,49	0,24	0,10	0,14	0,349	0,244
14	3,5	суглинок	1,76	0,39	0,24	0,10	0,14	0,260	0,044
15	6	супесь	1,99	0,25	0,22	0,19	0,03	0,077	0,032
16	3,6	супесь	1,75	0,37	0,23	0,16	0,07	0,084	0,148
17	2,5	супесь	1,54	0,54	0,29	0,22	0,07	0,292	0,094
18	5,5	супесь	1,61	0,44	0,33	0,27	0,06	0,296	0,066
19	7,5	супесь	1,39	0,42	0,28	0,23	0,05	0,344	0,190
20	4,4	супесь	1,36	0,92	0,31	0,25	0,06	0,478	0,092
21	3,5	супесь	1,51	0,72	0,31	0,26	0,05	0,241	0,104
22	5,5	супесь	1,66	0,30	0,24	0,19	0,05	0,294	0,146
23	4,4	супесь	1,66	0,42	0,31	0,25	0,06	0,278	0,092
24	3,5	супесь	1,71	0,32	0,31	0,26	0,05	0,241	0,104
9. Район уральского берега Байдарацкой губы									
1	3,5	песок пылеватый	1,68	0,28				0,089	0,070
2	2,9	песок пылеватый	1,57	0,34				0,080	0,098
3	8,5	песок пылеватый	1,78	0,21				0,068	0,027
4	9	песок пылеватый	1,79	0,25				0,314	0,119
5	9	песок пылеватый	1,76	0,23				0,066	0,007
6	2,2	песок пылеватый	1,62	0,48				0,341	0,239
7	2,9	песок пылеватый	1,42	0,79				0,300	0,050
8	1,8	песок пылеватый	1,96	0,22				0,062	0,027
9	1,5	песок пылеватый	1,85	0,28				0,111	0,060
10	2,1	песок пылеватый	1,86	0,28				0,101	0,086

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
11	2,7	песок пылеватый	1,98	0,21				0,079	0,038
12	2,9	песок пылеватый	1,76	0,35				0,095	0,057
13	2	песок пылеватый	1,81	0,31				0,089	0,047
14	4,75	суглинок	1,55	0,49	0,34	0,26	0,08	0,443	0,153
15	6	суглинок	1,49	0,49	0,40	0,29	0,11	0,208	0,027
16	3,1	суглинок	1,48	0,48	0,37	0,28	0,09	0,190	0,150
17	5,7	суглинок	1,19	0,52	0,45	0,32	0,13	0,513	0,096
18	1,5	суглинок	1,50	0,50	0,36	0,27	0,08	0,161	0,045
19	5,5	суглинок	1,61	0,48	0,38	0,22	0,15	0,214	0,021
20	1,5	суглинок	1,33	0,95	0,32	0,24	0,08	0,215	0,038
21	8,8	суглинок	1,78	0,92	0,34	0,25	0,09	0,096	0,039
22	7,3	суглинок	1,77	0,26	0,32	0,21	0,11	0,113	0,077
23	8	суглинок	1,71	0,30	0,32	0,22	0,10	0,104	0,025
24	9	суглинок	1,74	0,31	0,38	0,27	0,11	0,078	0,077
25	6,5	суглинок	1,84	0,27	0,32	0,23	0,10	0,135	0,061
26	7,8	суглинок	1,82	0,32	0,39	0,28	0,10	0,194	0,049
27	8,6	суглинок	1,80	0,33	0,37	0,26	0,11	0,202	0,057
28	5,6	суглинок	1,76	0,35	0,33	0,24	0,10	0,265	0,065
29	7,8	суглинок	1,88	0,33	0,32	0,24	0,08	0,073	0,046
30	7	суглинок	1,75	0,32	0,35	0,25	0,10	0,075	0,044
31	7,5	суглинок	1,80	0,27	0,29	0,21	0,09	0,095	0,053
32	8,1	суглинок	1,73	0,25	0,29	0,21	0,08	0,119	0,061
33	9	суглинок	1,75	0,29	0,35	0,25	0,10	0,102	0,057
34	4,5	суглинок	1,73	0,37	0,37	0,28	0,09	0,335	0,119
35	3,35	суглинок	1,60	0,45	0,37	0,27	0,10	0,147	0,083
36	4,5	суглинок	1,82	0,31	0,32	0,23	0,09	0,201	0,127
37	5,3	суглинок	1,89	0,37	0,37	0,27	0,10	0,114	0,051
38	5,5	суглинок	1,59	0,42	0,39	0,31	0,08	0,141	0,048
39	6,5	суглинок	1,87	0,30	0,33	0,24	0,09	0,086	0,054
40	6,8	суглинок	1,77	0,33	0,38	0,29	0,09	0,111	0,093
41	8	суглинок	1,77	0,33	0,37	0,28	0,09	0,119	0,104
42	9,6	суглинок	1,76	0,30	0,33	0,25	0,09	0,112	0,120
43	9	суглинок	1,81	0,30	0,35	0,26	0,09	0,107	0,091
44	3,5	суглинок	1,79	0,33	0,36	0,29	0,08	0,066	0,070
45	4	суглинок	1,69	0,42	0,37	0,28	0,09	0,224	0,118
46	6,6	суглинок	1,58	0,41	0,33	0,26	0,08	0,165	0,100
47	7	суглинок	1,76	0,35	0,37	0,28	0,09	0,198	0,108
48	6	суглинок	1,74	0,38	0,44	0,31	0,13	0,093	0,057
49	9,25	суглинок	1,84	0,35	0,43	0,30	0,13	0,066	0,082
50	6,5	суглинок	1,71	0,34	0,41	0,27	0,14	0,146	0,037
51	2,1	суглинок	1,67	0,43	0,34	0,24	0,10	0,196	0,308
52	1,2	суглинок	1,43	0,75	0,28	0,20	0,08	0,390	0,272
53	1,3	суглинок	1,47	0,68	0,42	0,33	0,09	0,296	0,277
54	2	суглинок	1,48	0,68	0,26	0,18	0,08	0,252	0,259

№	глубина	вид грунта	ρ , г/см ³	W, д.е.	W _p , д.е.	W _L , д.е.	I _p , д.е.	A, д.е.	m, МПа ⁻¹
55	2,7	суглинок	1,87	0,27	0,33	0,21	0,12	0,110	0,094
56	2,3	суглинок	1,84	0,29	0,35	0,25	0,11	0,135	0,234
57	3,5	супесь	1,71	0,27	0,25	0,21	0,04	0,093	0,049
58	3	супесь	1,72	0,41	0,34	0,27	0,07	0,198	0,042
59	4,5	супесь	1,80	0,29	0,25	0,20	0,04	0,110	0,022
60	5,7	супесь	1,84	0,31	0,26	0,21	0,05	0,115	0,022
61	7	супесь	1,83	0,28	0,23	0,20	0,04	0,095	0,024
62	9,3	супесь	1,71	0,28	0,25	0,20	0,05	0,084	0,025
63	2,7	супесь	1,80	0,36	0,34	0,31	0,04	0,192	0,103
64	3,6	супесь	1,76	0,32	0,30	0,26	0,05	0,169	0,115
65	8,25	супесь	1,81	0,28	0,30	0,24	0,07	0,085	0,037
66	8	супесь	1,84	0,27	0,31	0,25	0,06	0,096	0,071
67	2,5	супесь	1,88	0,29	0,30	0,24	0,06	0,278	0,108
68	2,9	супесь	1,94	0,23	0,25	0,19	0,06	0,129	0,171
69	2,4	супесь	1,83	0,30	0,16	0,13	0,03	0,118	0,161
70	2,2	супесь	1,92	0,24	0,26	0,20	0,05	0,101	0,137
71	1,7	супесь	1,78	0,33	0,25	0,18	0,06	0,149	0,185
72	2	супесь	1,35	0,95	0,31	0,27	0,04	0,592	0,147
73	1,4	супесь	1,95	0,23	0,21	0,15	0,06	0,117	0,051
74	2	супесь	1,84	0,29	0,26	0,21	0,06	0,123	0,042
75	3,1	супесь	1,78	0,33	0,27	0,22	0,05	0,132	0,129
76	1,5	супесь	1,80	0,32	0,20	0,15	0,05	0,129	0,112
77	1,6	супесь	1,72	0,38	0,22	0,15	0,06	0,165	0,091
78	2	супесь	1,88	0,26	0,25	0,22	0,03	0,099	0,129

Примечание: ρ - плотность мерзлого грунта, W- суммарная влажность мерзлого грунта, W_p, W_L – влажность нижнего и верхнего предела пластичности, I_p – число пластичности, A – коэффициент оттаивания, m – коэффициент сжимаемости