

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

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва
2014

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова на кафедре геокриологии геологического факультета

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, профессор
Роман Лидия Тарасовна

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Перльштейн Георгий Захарович,
профессор, ведущий научный сотрудник
лаборатории геокриологии ФГБУН Институт
геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН)

кандидат технических наук
Кроник Яков Александрович,
старший научный сотрудник, профессор кафедры
механики грунтов и геотехники ФГБОУ ВПО
«Московский государственный строительный
университет»

Ведущая организация: **НИИОСП им. Н.М. Герсеванова ОАО «НИЦ
«Строительство»**

Защита диссертации состоится 03 октября 2014 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.30 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, геологический факультет, аудитория 415.

Автореферат размещен на интернет-сайтах Геологического факультета МГУ им. Ломоносова www.geo.web.ru и Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru. С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Научной библиотеки Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, в Отделе диссертаций Фундаментальной библиотеки по адресу: Ломоносовский проспект, 27; сектор А, 8 этаж, к. 812).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 119234, г. Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.30, профессору В.Н. Соколову.

Автореферат разослан 23 июля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



В.Н. Соколов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. 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 обоим 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. Разработана комплексная методика, включающая экспериментальные исследования, математическое моделирование по программе «Termoground», прогноз деформаций в условиях компрессии с помощью параметрических уравнений.

2. Получены закономерности компрессионного деформирования грунтов при разных условиях оттаивания.

3. Установлены на основе регрессионного анализа экспериментальных данных зависимости характеристик оттаивающих грунтов от их состава и свойств.

4. Разработаны 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. Проведены расчеты по программе «Termoground» для прогноза влияния 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 им. 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризована научная новизна работы и ее практическая значимость.

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 (N.R. Morgenstern, L.B. Smith, F. Croy, E.J. Chamberlain, A.J. Luscher, E.C. McRoberts, C. Harris, J. F. Nixon, K. D. Eigenbrod, L.D. Keil, N.M. Nilsen, R.C. Gupta, T.L. Speer, G.H. Watson, C.G. Ryde'n 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 мерзлых грунтах при оттаивании, и их влияние 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, типа испытаний, размера образца, условий промерзания.

Во втором направлении в настоящий момент определились расчетный и экспериментальный подходы к определению осадок мерзлых грунтов при оттаивании. Расчетный подход основан на зависимостях осадки оттаивающих дисперсных грунтов от показателей физических свойств. Следует отметить, 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, набухание частиц грунта, различные физико-химические процессы, широкий диапазон дисперсности в пределах каждого вида грунта, скорость оттаивания и т.д.

Экспериментальный подход основан на определении коэффициентов оттаивания и сжимаемости в полевых и лабораторных условиях. Лабораторные компрессионные испытания являются самым распространенным методом. В последнее время получили широкое применение математические программы, использующие метод конечных элементов, для расчета осадок при оттаивании на основе экспериментальных деформационных характеристик. Повышение достоверности получаемых результатов остается одной из важных проблем как в теоретическом, так и в экспериментальном аспекте.

Необходимость исследований в области определения деформационных характеристик вызвана следующим обстоятельством. Полученное на основании решения Н.А. Цытовича (1941, 1973) определение осадки грунтов при оттаивании и уплотнении базируется на условиях соблюдения одномерной задачи (равномерного сжатия без возможности бокового расширения). На этой основе выделены две деформационные характеристики оттаивающих грунтов: коэффициент оттаивания (A), равный относительной осадке при оттаивании без нагрузки, и коэффициент сжимаемости (m), определяемый по линейной зависимости относительной осадки от давления на каждой ступени уплотнения. Такой метод расчета осадок утвержден в нормативных документах России (СП 25.13330.2012).

Соблюдение условий одномерной задачи уплотнения требует экспериментального определения деформационных характеристик при одностороннем оттаивании. Выполнение указанного требования связано с усложнением оборудования, методики испытаний и увеличением продолжительности опытов. Необходимо отметить, ряд исследователей использовали методику всестороннего оттаивания образцов (Croy, 1973, Аткачис, 1977, Киселев, 1978), но сравнение деформационных характеристик, определяемых по обоим методикам, не проводилось.

Трудоемкость и длительность опытов обуславливают необходимость разработки экспресс методик, позволяющих получать достоверные значения деформационных характеристик оттаивающих грунтов при сокращении затрат на их определение.

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

Глава 2. Состав и свойства исследуемых грунтов

Экспериментальные исследования проводились на грунтах, отобранных в различных регионах криолитозоны России (рис. 1).

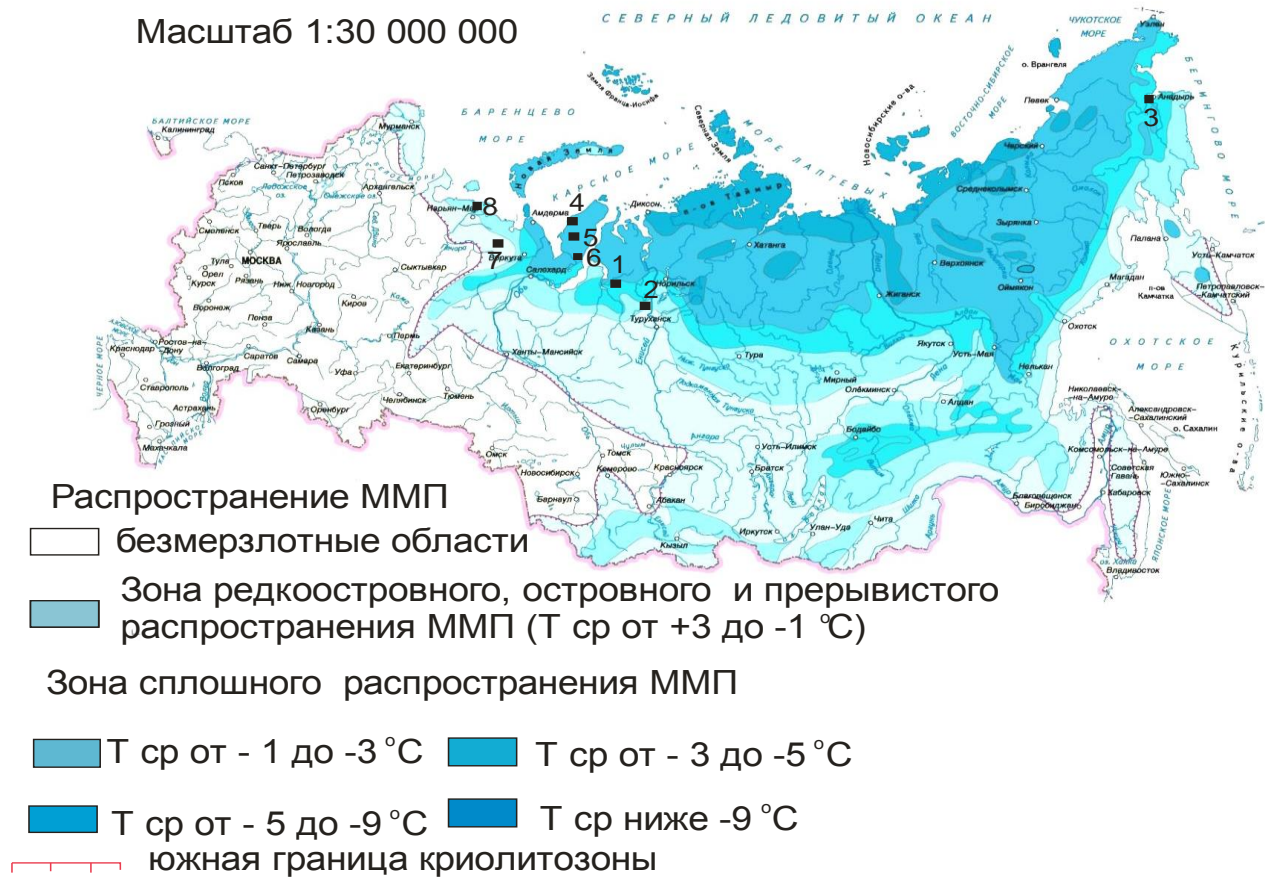


Рис. 1. Районы отбора проб: 1 - Таз-Енисейская область; 2 - Ванкорская возвышенность; 3 - г. Анадырь; 4 - Харасавэйское месторождение; 5 - южная часть Бованенковского месторождения; 6 - юго-восточное побережье полуострова Ямал; 7 - 220 км к северо-востоку от г. Усинска; 8 - 350 км к северо-западу от г. Усинска.

Отложения имеют плейстоценовый возраст с генетическими типами: 54 % морские, 22 % - ледово-морские, 16 % - морские, ледниково-морские, остальные 8 % - аллювиальные, озерно-аллювиальные, прибрежно-морские. Грунты представлены глинами, суглинками, супесями, песками пылеватыми и мелкими с преобладанием суглинка. Влажность грунтов меняется в

широких пределах: от 0,15 до 0,35 д.е. - для песка, от 0,15 до 0,96 д.е. - супеси, от 0,18 до 1,46 д.е. - суглинка. Грунты характеризуются большим разнообразием строения и криогенных текстур.

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.

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. Гранулометрический состав и геолого-генетическая характеристика представлены в таблице 1.

Диапазон изменений влажности и плотности принят по данным изысканий (табл. 2).

Таблица 1

Гранулометрический состав исследуемых грунтов и геолого-генетическая характеристика

Генезис, возраст	Название грунтов	Содержание частиц в каждой фракции, %							
		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
<i>рт</i> Q _{III}	Песок пылеватый	1	4	47	32	6	4	4	2
<i>т, гт</i> Q _{II}	Супесь песчанистая	1	4	63	14	8	4	4	2
<i>т, гт</i> Q _{II}	Суглинок легкий пылеватый	1	1	10	25	30	13	10	10

Исследования выполнялись для массивной и слоистой криогенной текстуры с одним шпиром льда размером 2 мм и тремя шпиром размером 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. Результаты статистической обработки вариации плотности и влажности представлены в таблице 2. Установлено, что коэффициент вариации для влажности не превышает 3 %, а плотности - 1 %. Наибольшие значения коэффициента вариации характерны для глинистых образцов. Их незначительные величины позволяют выявить общие закономерности влияния условий оттаивания на деформационные характеристики.

Статистическая обработка величин влажности и плотности исследуемых грунтов (W_{tot} – влажность, д.е., ρ – плотность, г/см³)

№	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	0,01	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

Глава 3. Методика исследований и обработки опытных данных

Исследования включали:

1. Экспериментальные определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов и коэффициента вязкости.
2. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния процесса оттаивания и уплотнения по программе «Termoground».
3. Расчетные методы прогноза деформаций оттаивающих грунтов.

Экспериментальные исследования по определению деформационных характеристик выполнялись в соответствии с ГОСТ 12248-2010 на образцах диаметром 71 мм, высотой 35 мм.

По полученным зависимостям относительной осадки на каждой ступени нагрузки от времени (рис. 2 а) и условно стабилизированной осадки от напряжения (рис. 2 б) определялись значения коэффициента оттаивания (A) и коэффициента сжимаемости (m).

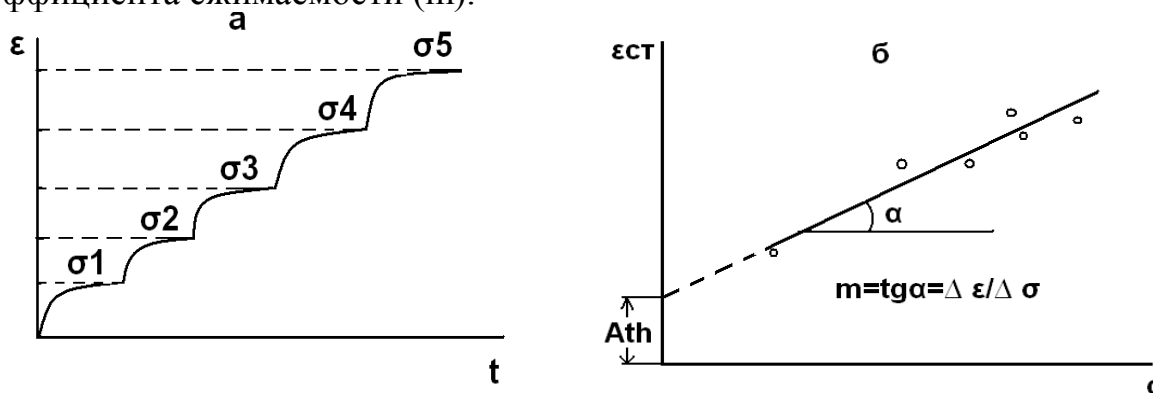


Рис. 2. Зависимости развития относительной осадки от времени при каждой ступени нагружения (а), стабилизированной осадки от напряжения (б)

Испытания модельных образцов проводились при одностороннем и

всестороннем оттаивании. Схемы приборов приведены на рис. 3.

Коэффициент динамической вязкости мерзлых и оттаянных образцов определялся вдавливанием сферического штампа, по разработанной нами методике, позволяющей получать реологические кривые на участке шведовой вязкости (рис. 4).

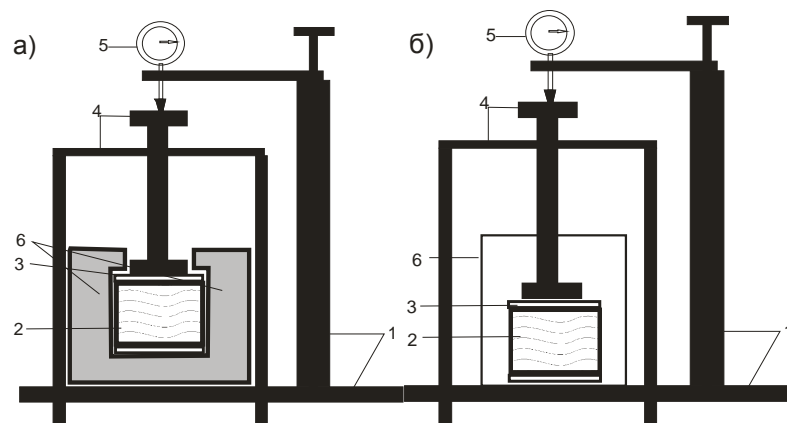


Рис. 3. Схема приборов для условий одностороннего (а) и всестороннего оттаивания (б): 1 – станина; 2 – кольцо с грунтом; 3 – перфорированный штамп; 4 – система рычагов для подачи нагрузки; 5 – индикатор; б: а) нетеплопроводный корпус; б) внешний цилиндр.

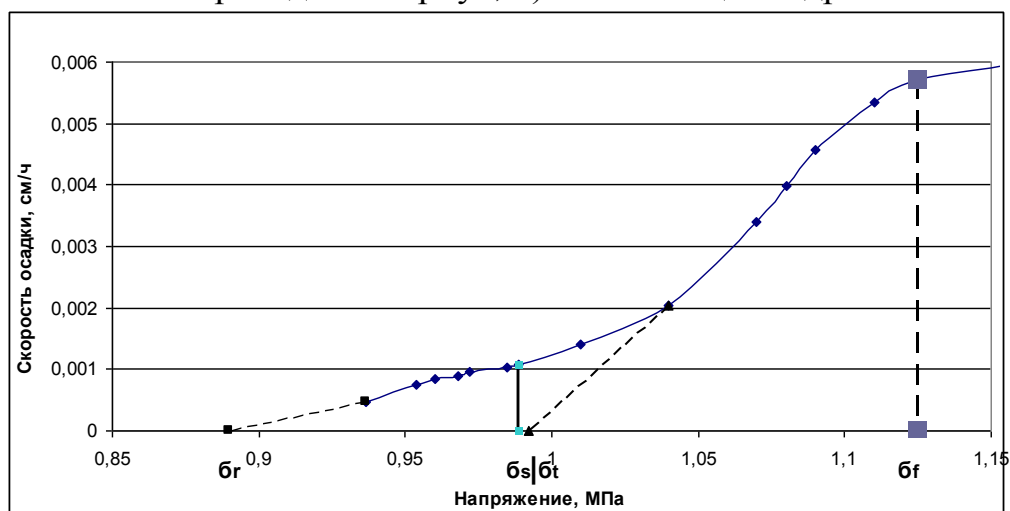


Рис. 4. Пример реологической кривой суглинка ($\rho = 1,87 \text{ г/см}^3$, $W_{\text{tot}} = 0,30$ д.е., $\theta = -2 \text{ }^\circ\text{C}$) по данным вдавливания шарикового штампа (σ_t и σ_s - напряжения начала и окончания диапазона шведовой вязкости, σ_t и σ_f - напряжения начала и окончания диапазона бингамовой вязкости)

Математическое моделирование процесса оттаивания и уплотнения выполнялось для условий лабораторных (с односторонним и всесторонним оттаиванием) и полевых испытаний горячими штампами. Решалась тепловая задача, позволяющая определить температурные поля на каждый период времени (рис. 5, 6). Для расчетов использовалось уравнение теплопроводности с учетом фазовых превращений в условиях нестационарного теплового режима

в трехмерной постановке. Затем определялась осадка грунта при оттаивании и уплотнении с использованием ее зависимости от физических свойств и коэффициента уплотняемости (по М.Ф. Киселеву).

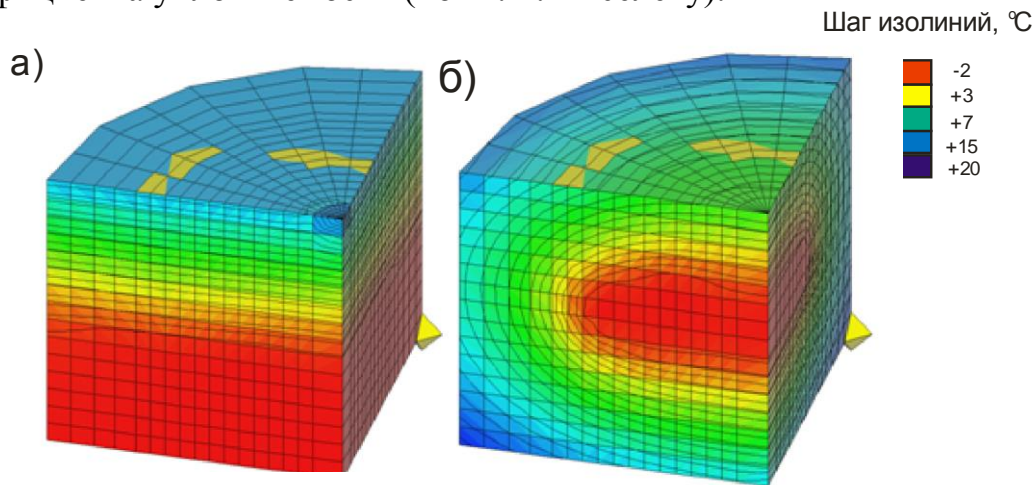


Рис. 5. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи: а) одностороннего; б) всестороннего оттаивания

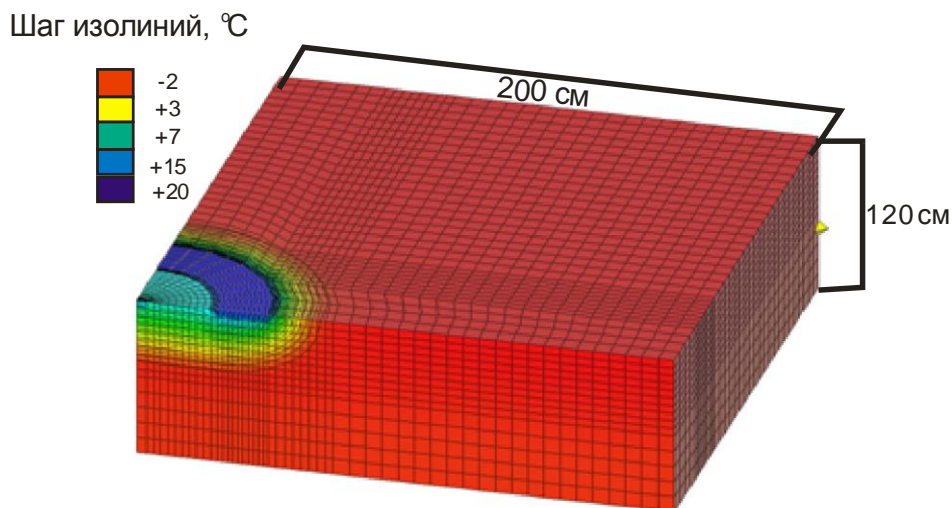


Рис. 6. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи оттаивания под штампом

Расчетные методы прогноза деформаций основаны на решении уравнений теории упруго-вязкого деформирования и феноменологических формул, параметры которых определялись экспериментально для грунтов ненарушенной структуры и модельных образцов с различными физическими свойствами.

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

Для всех исследованных образцов прослеживалась линейная зависимость условно-стабилизированной осадки уплотнения от напряжения.

Значения коэффициентов оттаивания при всестороннем оттаивании больше или равны таковым при одностороннем. Максимальное отличие между ними составляет: для песка 16 %, супеси 19 %, суглинка 27 %. Коэффициент вариации коэффициента оттаивания для обоих условий оттаивания не превышает 9 %.

Коэффициент сжимаемости больше при одностороннем оттаивании. Максимальная разница между значениями составляет: для песка 19 %, супеси 24 %, суглинка 33 %. При этом коэффициент вариации для обоих условий оттаивания не превышает 13 %.

Таким образом, коэффициент вариации деформационных характеристик не превышает 15 %, поэтому можно говорить о достаточной однородности выборки данных.

Значения деформационных характеристик удовлетворяют правилу «трех сигм» (если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения), поэтому можно использовать критерии сравнения математических ожиданий и дисперсий двух методик (одностороннего и всестороннего оттаивания).

Сравнение степени разброса (дисперсий) получаемых характеристик выполнено на основе распределения Фишера. При этом данный критерий равен отношению двух дисперсий (большой к меньшей), вычисленных для значений, полученных при одностороннем и всестороннем оттаивании. Полученное значение сравнивалось с табличным, которое для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и двух степеней свободы соответствует 19 (Спирин, 2004). Рассчитанные значения критерия Фишера для всех грунтов меньше 19, следовательно, дисперсии деформационных характеристик при разных условиях оттаивания равны.

Сравнения средних значений выполнялось по t-критерию (распределение Стьюдента) для двух независимых выборок данных при равных дисперсиях. Полученные данные t-критерия оказались меньше критического значения для всех видов грунтов, что свидетельствует о равнозначности двух методик определения деформационных характеристик.

Установлено, что коэффициенты оттаивания и сжимаемости уменьшаются с увеличением количества шпиров в связи с образованием макропор, которые полностью не разрушаются и концентрируют влагу. Наибольшее влияние указанного фактора выявлено для суглинка.

Выявлено, что условия оттаивания и уплотнения в песчаных образцах не влияют на значения плотности и влажности. В глинистых образцах наблюдалось достаточно равномерное распределение влажности при одностороннем оттаивании, а при всестороннем отмечалось понижение влажности в центре и ее повышение к боковой поверхности. Это связано с неравномерностью распределения нагрузки при оттаивании.

Получено, что условия оттаивания не влияют на коэффициент динамической вязкости оттаявших глинистых образцов, который уменьшается в 160-200 раз по сравнению с мерзлым состоянием.

Таким образом, в условиях заданных равнозначных значений начальной влажности, размеров образцов, дренажных параметров приборов, условия оттаивания влияют на физическую сторону процесса консолидации. 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.

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

Исследования формирования температурного режима и осадок при одностороннем и всестороннем оттаивании выполнено для модельных образцов супеси и суглинка, испытанных в лабораторных условиях. Результаты расчета времени оттаивания представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение времени оттаивания образцов при разных условиях оттаивания

Вид грунта	W_{tot} , д.е.	Время окончания оттаивания, определенное 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

Установлено, что период времени при всестороннем оттаивании сокращается в 2,5-3 раза. При этом заданная температура оттаивания составляет + 20 °С. В расчетах не учитывалось изменение физических свойств грунтов в процессе оттаивания.

Сравнение результатов решения механической задачи с опытными

данными представлено в табл. 4. Осадки при всестороннем оттаивании на 5-20 % больше таковых при одностороннем. Наибольшее отличие характерно для суглинка. Для супеси, при влажности 0,18 д.е., условия оттаивания практически не повлияли на значения осадок. Полученные несоответствия осадок связаны с неравномерностью распределения напряжения в грунте в процессе оттаивания. При всестороннем оттаивании грунта мерзлое ядро является концентратором напряжения, что увеличивает значение напряжения в три раза у ядра по сравнению с таковым у стенок. Это приводит также к большему уплотнению в центре образца и перераспределению влажности по его объему.

Таблица 4

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

Получено, что экспериментальные значения осадок в 1,5-4 раза превысили расчетные. Это связано с тем, что принятая в программе экспериментальная зависимость осадки от физических свойств грунта и уплотняющего давления (по М.Ф. Киселеву) не учитывает криогенного строения и различных физико-механических процессов, протекающих при оттаивании и уплотнении.

Кроме этого, не учитывается изменение свойств грунтов в процессе оттаивания и уплотнения на каждый момент времени. Используемая зависимость получена по опытным данным испытаний искусственно увлажненных и замороженных грунтов, что также может привести к погрешностям при расчете осадок оттаивающих грунтов различного генезиса. Но при этом значения, полученные по этим данным, позволяют оценить закономерности изменения деформационных характеристик при разных условиях оттаивания и видах испытаний.

Для проверки модели полевых испытаний была рассчитана задача осадки штампа по данным исследований Г.М. Пахомовой (1981), В.П. Ушкалова (1962). Модельными расчетами период времени оттаивания получен примерно таким же, а осадка в 2-2,5 раза меньше.

Программа «Termoground» также использовалась для сравнения расчетных значений деформационных характеристик лабораторных испытаний (при одностороннем оттаивании) и полевых испытаний горячими штампами (табл. 5).

Различный характер распределения напряжений при компрессионных и штамповых испытаниях приводит к увеличению коэффициента оттаивания и

сжимаемости на 5-40 %.

Таблица 5

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

Вид грунта	W_{tot} , д.е.	Деформационные характеристики, рассчитанные для условий:			
		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

Для повышения достоверности количественных значений деформационных характеристик необходимы дальнейшие исследования, направленные на выбор исходных уравнений, учитывающих комплекс факторов, определяющих осадки оттаивания и уплотнения.

Таким образом, 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

С целью разработки методов сокращения продолжительности испытаний выполнены исследования, направленные на оценку достоверности математического описания процесса деформирования оттаявших грунтов при уплотнении. Линейная зависимость стабилизированной осадки от напряжения (подтвержденная многими авторами и нашими исследованиями для всех испытанных грунтов) позволяет ограничиться этой зависимостью, полученной на первых ступенях нагружения, для определения деформационных характеристик.

Расчеты выполнялись по уравнению С.С. Вялова, полученного на основе теории старения и феноменологическим формулам степенного и логарифмического вида (табл. 6).

Пример сопоставления экспериментальных и расчетных значений относительной осадки представлен на рис. 7.

Параметры уравнений рассчитывались по опытным данным, полученным на второй и третьей ступенях нагружения. Расчет по (1) - (3) определялись стабилизированные значения осадок на четвертой и пятой ступенях нагружения. По полученным данным вычислялись расчетные деформационные характеристики. Относительная погрешность определения деформационных характеристик по данной методике рассчитывалась как

отношение разности между экспериментальным и расчетным значением к значению, определенному экспериментально.

Таблица 6

Прогнозные уравнения деформаций оттаявших грунтов

Вид уравнения	Уравнение	Обозначения
степенное	$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{A_n} \right)^{1/m} \left(\frac{t}{T} \right)^\beta \quad (1)$	ε - относительная деформация, д.е.; t- время, мин; б- нагрузка, МПа; $A_n, m, T, \beta, \delta, \xi, \alpha$ - опытные параметры
логарифмическое	$\varepsilon = \left(\frac{\sigma^* \delta}{An} \right)^{1/m} \ln \left(\frac{t+T}{T} \right) \quad (2)$	
степенное (на основе теории старения С.С. Вялова)	$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{\xi} \cdot t^\alpha \right)^{1/m} \quad (3)$	

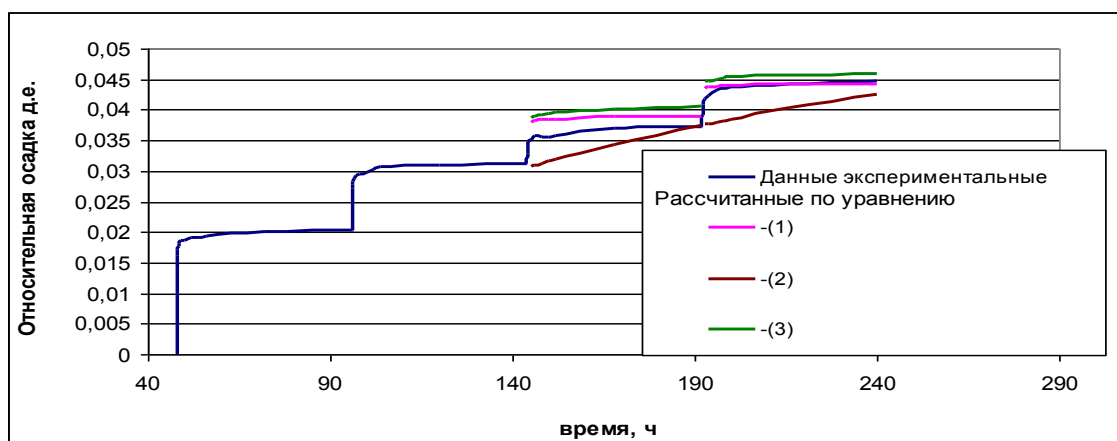


Рис. 7. Зависимость относительной осадки от времени по экспериментальным и расчетным данным суглинка с $W = 0,30$ д.е., $\rho = 1,86$ г/см³

Результаты оценки достоверности, полученные для модельных образцов, показали: относительная погрешность определения коэффициента оттаивания вне зависимости от использованного уравнения не превышала 8 %. Коэффициент сжимаемости имел наименьшую относительную погрешность (до 25 %) при использовании уравнения (3).

Анализ расчета деформационных характеристик по уравнению (3) для грунтов ненарушенного сложения Таз-Енисейской области показал: относительная погрешность значений коэффициента оттаивания также не превышает 8 %, а коэффициент сжимаемости в ряде случаев отличался для глинистых грунтов на 25-50 % в связи с влиянием на характер деформирования криогенного строения.

Выполнены также исследования прогноза деформаций на четвертой и пятой ступени в зависимости от периода времени достижения стабилизированной осадки на второй и третьей ступени уплотнения по уравнениям (4) - (6) (табл. 7)

Максимальная относительная погрешность определения деформационных характеристик по данным решения уравнений (4) - (6) для

грунтов ненарушенного сложения различных регионов приведена в табл. 8.

Таблица 7

Прогнозные уравнения зависимости стабилизированной осадки от времени

Вид уравнения	Уравнение	Обозначения
степенное	$\varepsilon_t = S_n * t^B$ (4)	t – время, ч., ε_t – относительная деформация, д.е., B, Sn, D, T – опытные параметры
логарифмическое	$\varepsilon_t = D + B * \ln(t + 1)$ (5)	
дробно-линейное	$\varepsilon_t = \frac{S_n * t}{T + t}$ (6)	

Таблица 8

Максимальная относительная погрешность определения коэффициента оттаивания (A) и сжимаемости (m) по данным прогноза

Регион	Вид грунта	Количество опытов	Уравнение	Максимальная относительная погрешность (%) определения коэффициента	
				оттаивания	сжимаемости
Полуостров Ямал	Песок пылев.	20	(6)	7	14
	Супесь	40	(5)	12	55
	Суглинок	87		10	50
	Глина	17	(6)	15	50
Таз - Енисейская область	Песок пылев.	16	(6)	3	13
	Супесь	27		5	24
	Суглинок	53		7	25
Европейская часть России	Песок пылев.	15	(5)	4	15
	Супесь	20		8	21
	Суглинок	57		10	25
Чукотка	Супесь	6	(5)	6	23
	Суглинок	10	(6)	8	24
Ванкорская возвышенность	Песок мелкий	12	(6)	3	11
	Супесь	13		5	19
	Суглинок	29		(4)	7

Погрешность определения коэффициента оттаивания по расчетным уравнениям для 90 % всех испытанных грунтов не превышает 10 %. Наибольшее отклонение получено для глины. При этом отмечается, что с увеличением влажности отклонение уменьшается, что обусловлено фильтрацией грунтовой влаги в процессе оттаивания.

Значения прогнозных коэффициентов сжимаемости для грунтов района Ямала имеют максимальное отклонение по сравнению с опытными, составляющее около 50 %, что обусловлено высокой льдистостью и различными криогенными текстурами, что затрудняет применение данной аппроксимации.

Таким образом, предложенный экспресс метод проведения испытаний оттаивающих грунтов может рекомендоваться для определения коэффициента оттаивания.

Корреляционный анализ зависимости деформационных характеристик оттаивающих грунтов от физических свойств до оттаивания показал следующее. Основными показателями, влияющими на коэффициент оттаивания в наибольшей степени являются симплексы: для глинистых грунтов - плотность скелета (ρ_d) и отношение разности суммарной влажности (W) и влажности нижнего предела пластичности (W_p) к степени водонасыщения (S_r); для песчаных - плотность скелета и отношение суммарной влажности (W) к степени водонасыщения (S_r) (рис. 8, 9).

На основе регрессионного анализа (с оценкой критериев Фишера и Стьюдента), получены уравнения зависимости коэффициента оттаивания от показателей физических свойств (табл. 9)

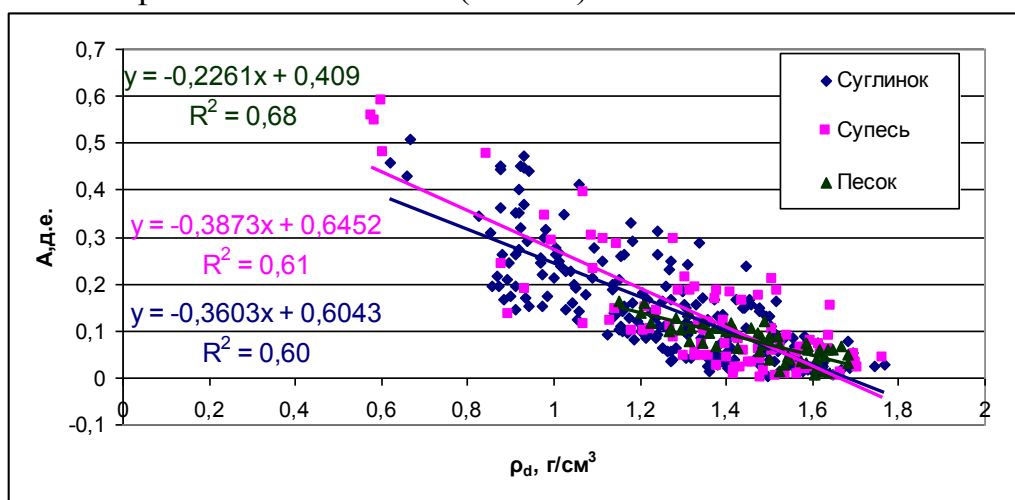


Рис. 8. Зависимости коэффициента оттаивания от плотности скелета различных видов грунтов

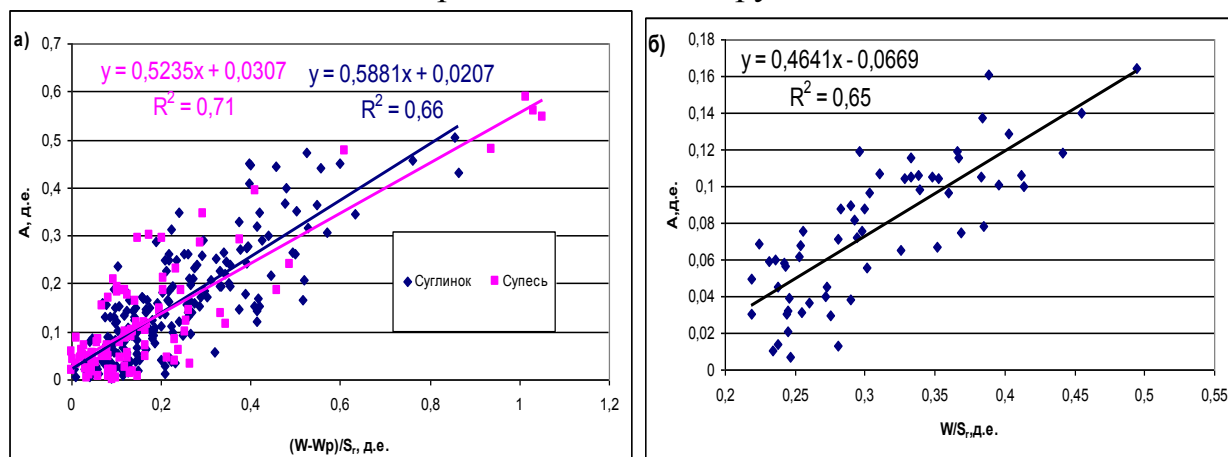


Рис. 9. Зависимости коэффициента оттаивания супеси и суглинка от $(W-W_p)/S_r$ (а), песка от W/S_r (б)

Установлено, что при природном давлении до 0,1 МПа определение осадок оттаивающих грунтов без учета уплотняющего давления от дополнительных нагрузок допустимо определять только с учетом

коэффициента оттаивания. Используя уравнения (7) - (9), рассчитана осадка под действием собственного веса при высоте слоя 1 м с использованием коэффициента 1,15, так как не учитывалось уплотнение грунта после оттаивания. Получено, что для 90 % опытов абсолютная погрешность расчетов по вышеописанной методике и с использованием экспериментальных данных не превышает 10 см, в среднем: для песчаных грунтов - 5 см, а для глинистых - 7 см. Такой подход успешно может использоваться для оценки осадок грунтов морского, ледово-морского и ледниково-морского генезиса в основании дорог, трубопроводов при наземной прокладке.

Таблица 9

Прогнозные уравнения для расчета коэффициента оттаивания	
Вид грунта	Уравнение
песок	$A=0,416-0,23\rho_d$ (7)
супесь	$A = 0,32 - 0,187\rho_d + 0,32\frac{W - Wp}{Sr}$ (8)
суглинок	$A = 0,23 - 0,145\rho_d + 0,393\frac{W - Wp}{Sr}$ (9)

Таким образом, на основе регрессионного анализа экспериментальных данных (более 400 образцов) получены зависимости коэффициента оттаивания от состава и свойств грунтов (уравнения (7) - (9), что позволило сформулировать третье защищаемое положение.

Рассмотрение процесса консолидации грунта при оттаивании и уплотнении показало возможность выполнения прогноза относительной деформации по опытным данным восьмичасовых испытаний по уравнениям (4)-(6). Пример обработки опытных данных указанным способом для суглинка приведен на рис. 10. Получено, что уравнение (4) дает прогнозные значения наиболее близкие к опытным.

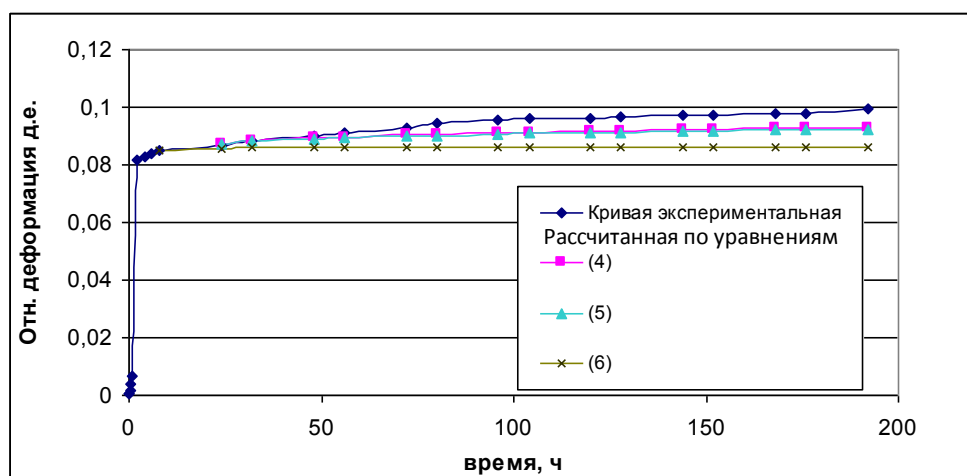


Рис. 10. Пример расчета относительной осадки от времени на первой ступени нагружения суглинка ($W = 0,31$ д.е., $\rho = 1,74$ г/см³)

По значениям относительных осадок оттаивания под природным давлением получены эмпирические уравнения для расчета коэффициента оттаивания (табл. 10)

Используя полученные значения коэффициента оттаивания, относительной деформации и нагрузки на первой ступени по общей зависимости стабилизированной осадки от напряжения (рис. 2) определяем коэффициент сжимаемости.

Расчет осадок с применением данного экспресс метода показал, что абсолютная погрешность определения осадки слоя грунта, равного один метр, не превышает в среднем 4 см для глинистых грунтов, 2 см для песчаных.

Таблица 10

Уравнения для определения коэффициента оттаивания (A) по опытным данным относительной осадки оттаивания под природным давлением (ε_1)

Вид грунта	Уравнение
песок	$A = \varepsilon_1 * 0,9982 - 0,0029$ (10)
супесь	$A = \varepsilon_1 * 1,0069 - 0,0052$ (11)
суглинок	$A = \varepsilon_1 * 1,008 - 0,0086$ (12)

Таким образом, 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 %, 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 ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Котов, П.И. Обобщение деформационных характеристик оттаивающих грунтов / **П.И. Котов** // Основания, фундаменты и механика грунтов – 2013 – №3 – с. 23-26
2. Роман, Л.Т. Определение вязкости мерзлых грунтов шариковым штампом / Л.Т. Роман, **П.И. Котов** // Криосфера Земли – 2013 – №4 – с. 30-35
3. Царапов, М.Н. Свойства мерзлых грунтов при оттаивании / М.Н. Царапов, **П.И. Котов** // Путь и путевое хозяйство – 2013 – № 9 – с. 31-34

Статьи и тезисы на российских и международных конференциях:

1. Котов, П.И. Исследование деформационных свойств оттаивающих грунтов / **П.И. Котов** // Сборник тезисов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2011
- URL: http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2011/1189/16026_11ea.pdf

2. Котов, П.И. Исследование деформационных характеристик оттаивающих грунтов / **П.И. Котов** // Материалы 4-ой конференции геокриологов России, Москва, 2011 – том 1 – с. 86-91

3. Котов, П.И. Новые подходы к определению механических свойств грунтов оснований инженерных сооружений на Севере / **П.И. Котов** // Межрегиональный форум «Международное сотрудничество молодых ученых: северное измерение», Архангельск, 2011

4. Котов, П.И. Применение феноменологических формул для прогноза деформаций грунтов при оттаивании / **П.И. Котов**, Л.Т. Роман // Тезисы докладов III Всероссийского научного молодежного форума геокриологов, Якутск – 2013 – с. 86-91

5. Котов, П.И. Изменение свойств мерзлых грунтов при оттаивании и уплотнении / **П.И. Котов** // Тезисы докладов I Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Наука о Земле. Современное состояние», Новосибирск – 2013 – с. 146-147

6. Котов, П.И. Исследование механических свойств мерзлых грунтов при оттаивании / **П.И. Котов**, М.Н. Царапов, Л.Т. Роман // Тезисы докладов XIV Международной научной конференции студентов и аспирантов «Проблемы арктического региона», Мурманск – 2014 – с. 18-19

7. Царапов, М.Н. Современные проблемы исследований механических свойств оттаивающих грунтов / М.Н. Царапов, **П.И. Котов** // Научная конференция «Ломоносовские чтения», Москва – 2012

URL: http://wap.web.ru/pubd//2012/06/01/0001186421/pdf/tsapov_kotov_2012.pdf

8. Kotov, P.I. The study of deformation characteristics of thawing soils of Vankor oilfield / **P.I. Kotov** // Proc. of European Geosciences Union General Assembly, Geophysical research abstracts, Vienna – 2011

URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-527.pdf>

9. Kotov, P.I. Dependence of Vankor oilfield soils deformation characteristics on their physical properties / **P.I. Kotov**, M. N. Tsarapov // Proc. of 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference, Novosibirsk – 2012 – p. 86

10. Kotov, P.I. Impact of thawing on soil deformation / **P.I. Kotov** // Proc. of tenth International Conference on Permafrost, Salekhard – 2012 - vol 2 – p. 199-205

11. Kotov, P.I. Summary results of experimental studies thawing soils settlement of Bolshekhetskaya depression field / **P.I. Kotov**, M. N. Tsarapov // Proc. of International Conference on Cryosphere: Changes, Impacts and Adaptation, Sanya – 2012 – p.149

12. Kotov, P.I. Impact of cryogenic textures on the deformation properties / **P.I. Kotov**, M.N. Tsarapov // Proc. of International Conference «Earth Cryology: XXI Century», Pushchino – 2013 – p. 103-104

13. Kotov, P.I. Methodological aspects of compression tests thawing soils / **P.I. Kotov**, M.N. Tsarapov // Proc. of 5th International Scientific Conference of young scientists and students «Fundamental and applied geological science: achievements, prospects, problems and ways of their solutions», Baku – 2013 – p. 181-183