

УДК 624.139.6

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТТАИВАНИЯ И ВИДА ИСПЫТАНИЙ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ

*Представлены результаты лабораторных исследований деформационных характеристик оттаивающих грунтов при одностороннем и всестороннем оттаивании. Проведено сопоставление данных лабораторных испытаний с испытаниями горячим штампом и результатами математического моделирования по программе "Ternograund". Установлены границы изменений коэффициентов оттаивания и сжимаемости различных видов грунтов. Даны рекомендации по применению всестороннего оттаивания для лабораторных определений деформационных характеристик грунтов при инженерных изысканиях.*

### КОТОВ ПАВЕЛ ИГОРЕВИЧ

Кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, член Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (Москва, Россия).  
Основное направление научной деятельности – механика мерзлых и оттаивающих грунтов.  
Автор 22 опубликованных работ.

### РОМАН ЛИДИЯ ТАРАСОВНА

Доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры геокриологии геологического факультета МГУ (Москва, Россия).  
Основное направление научной деятельности – механика мерзлых грунтов.  
Автор более 160 опубликованных работ.

### САХАРОВ ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ

Доктор технических наук, профессор кафедры "Геотехника" Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, заместитель генерального директора института "Геореконструкция", член Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (Санкт-Петербург, Россия).  
Автор более 150 опубликованных работ.

### ПАРАМОНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

Доктор технических наук, профессор кафедры "Основания и фундаменты" Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения, технический директор института "Геореконструкция", член Президиума Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, член Технического комитета №212 "Фундаменты глубокого заложения" Международного общества по механике грунтов и геотехнике (ISSMGE) (Санкт-Петербург, Россия).  
Автор более 130 опубликованных работ.

### ПАРАМОНОВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

Кандидат технических наук, ведущий инженер ООО "ИСП "Геореконструкция" (Санкт-Петербург, Россия).  
Основное направление научной деятельности – механика мерзлых грунтов.  
Автор 7 опубликованных работ.

### Введение

Прогноз деформаций грунтов при оттаивании выполняется решением двух типов задач: температурной и механической. Ввиду многокомпонентности мерзлого грунта, условий оттаивания, а также зависимости осадки при оттаивании от различных физических свойств, прогноз деформаций является достаточно сложной задачей, требующей дальнейшего повышения достоверности определения деформационных характеристик оттаивающего грунта и закономерностей их изменения.

Первоначально испытания для определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов проводились в приборах, обеспечивающих одностороннее оттаивание, для которого разработаны методы прогноза осадок [1,2]. В последнее время все чаще испытания проводятся в условиях всестороннего оттаивания. Однако данные для обоснования такого подхода и исследования по выявлению влияния условий оттаивания на деформационные характеристики грунтов практически отсутствуют [3].

Накоплено незначительное количество данных, позволяющих сравнивать деформационные характеристики, полученные в лабораторных и полевых условиях. Следует отметить, что данные полевых испытаний были получены при различных условиях их проведения. Так, в работах В.П. Ушкалова [4], П.Д. Бондарева [5], Г.В. Порхаева [6] испытания проводились до предельного значения глубины оттаивания, а в работах Г.И. Пахомовой [7], В.В. Докучаева [8], В.А. Сорокина [9,10], Ю.Г. Федосеева [11] В.Д. Пономарева [12], А.А. Колесова [13], А.И. Золотаря [14], Л.Н. Хрусталева [15] при оттаивании на 1/2 диаметра штампа с обогревающим кольцом равным 1/3 диаметра штампа. Сравнение данных деформационных характеристик, полученных в полевых и лабораторных условиях, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Автор	Район	Грунт	$A_k/A_{ш}$	$m_k/m_{ш}$
П.Д. Бондарев	Салехард	глинистый	–	1,4-3,0
Г.В. Порхаев	Воркута	глинистый		1,3-1,8
В.П. Ушкалов	Забайкалье	глинистый	1,1-1,5	1,1-1,3
В.В. Докучаев	–	песок	5,0	–
В.Д. Пономарев	–	глинистый	10,0	–
Л.Н. Хрусталеv	Воркута	суглинок	1,8-2,0	1,2-1,3
		песок	1,1-1,3	1,0-1,2
В.А. Сорокин	Воркута	глинистый	1,1-3,0	1,3-5,0
		песок	1,0-2,0	1,4-2,7
А.А. Колесов	Западная Сибирь	песок	1,0-1,1	1,0-1,1
А.И. Золотарь	Новый Уренгой	глинистый	20,0	2,4
Г.И. Пахомова	Усть-Илим	суглинок	1,1-1,2	1,1-1,2

Коэффициенты оттаивания, определенные в лабораторных условиях ( $A_k$ ) и полевых ( $A_{ш}$ ); коэффициенты сжимаемости, определенные в лабораторных условиях ( $m_k$ ) и полевых ( $m_{ш}$ )

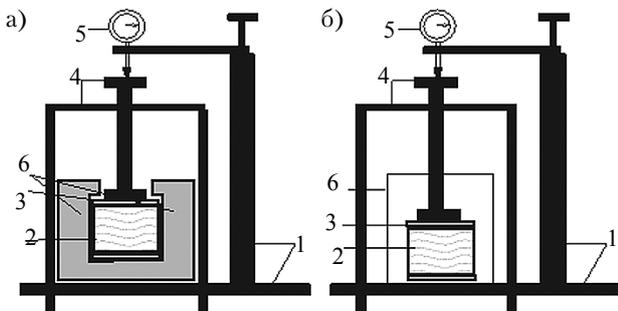


Рис. 1. Схемы приборов всестороннего (а) и одностороннего (б) оттаивания:

1 - станина; 2 - металлическое кольцо с грунтом; 3 - перфорированный штамп; 4 - система рычагов для подачи нагрузки; 5 - индикатор; 6 - а) внешний цилиндр б) нетеплопроводный корпус

Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициенты сжимаемости, полученные в лабораторных условиях, могут быть как равными, так и больше примерно в 3 раза данных полевых испытаний. Для песчаных грунтов эти значения, как правило, совпадают. Коэффициент оттаивания, полученный в лабораторных условиях, превышает данные полевых испытаний в 2...20 раз. На разброс деформационных характеристик в значительной степени влияют криогенное строение, влажность, льдистость и другие факторы. Выделить отдельно влияние условий оттаивания чрезвычайно сложно.

Для решения этих задач были проведены лабораторные испытания по определению деформационных характеристик образцов глинистых грунтов при различных условиях оттаивания (одностороннего и всестороннего). Параллельно проводилось математическое моделирование процесса оттаивания в программе "Termoground" [16], которая позволяет рас-

Таблица 2

Содержание частиц в каждой фракции, %								Название грунтов (по 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	
1,1	3,7	63,9	13,7	8,4	3,6	3,6	2,1	Супесь тяжелая пылеватая
0,7	1,1	11,2	24,5	30,2	12,9	10,4	9,7	Суглинок легкий пылеватый

Таблица 3

Состав грунта	$W_{tot}$ д.е.	$W_{из}$ д.е.	$\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	$W_p$ д.е.	$W_L$ д.е.	$t_{из}$ °С
Супесь	0,18	0,05	1,68	0,136	0,183	-0,1
	0,28	0,05	1,49	0,136	0,183	-0,1
Суглинок	0,3	0,1	1,43	0,2	0,295	-0,2
	0,4	0,1	1,24	0,2	0,295	-0,2

смаживать при оттаивании совместное влияние теплового режима и напряженно-деформированного состояния грунта.

### Методика исследований

#### а) Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились на глинистых образцах нарушенной структуры, приготовленных из кернов, отобранных на территории Таз-Енисейской области с глубины до 5 м, имеющих морской, ледниково-морской генезис. Гранулометрический состав определялся ареометрическим методом (табл. 2).

Состав и заданные физические свойства представлены в табл. 3 ( $W_{tot}$  – влажность;  $W_{из}$  – влажность за счет незамерзшей воды;  $\rho_d$  – плотность скелета грунта;  $W_p$ ,  $W_L$  – влажность нижнего и верхнего предела пластичности;  $t_{из}$  – температура начала замерзания грунта).

Испытания проводились с трехкратной повторностью по стандартной методике компрессионного сжатия мерзлых грунтов при оттаивании [17] с использованием одометров, позволяющих создавать условия одностороннего и всестороннего оттаивания (рис. 1).

Исследования при одностороннем оттаивании выполнялись в одометрах, изготовленных из капролона (нетеплопроводного материала – теплопроводность 0,23 Вт/м·К), что обеспечивало тепловую изоляцию образцов по боковой поверхности и нижнему торцу (размер стенок корпуса 3 см) (рис. 1,а), при всестороннем – в неизолированных компрессионных приборах (рис. 1,б).

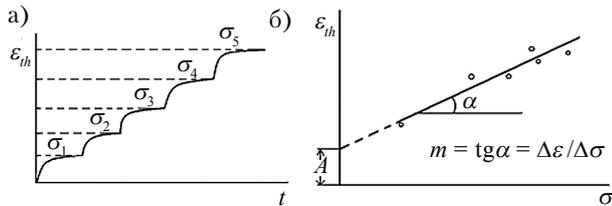


Рис. 2. Зависимости развития:

а - относительной осадки от времени на каждой ступени нагружения; б - стабилизированной осадки от напряжения

Испытания по определению деформационных характеристик выполнялись в три этапа:

I - уплотнение мерзлого образца при отрицательной температуре нагрузкой 0,1 МПа.

II - оттаивание при температуре  $+20^\circ\text{C}$  и той же нагрузке.

III - уплотнение оттаявшего образца ступенчато-возрастающей нагрузкой. После стабилизации осадки на каждой ступени нагрузку увеличивали на 0,05 МПа и выдерживали до условной стабилизации осадки (0,01 мм за 12 ч).

Общее количество ступеней нагружения - пять.

По полученным данным (рис. 2) устанавливали зависимости относительной осадки на каждой ступени нагрузки от времени (а) и условно стабилизированной от напряжения (б), по которым определялись коэффициент оттаивания  $A$ , равный относительной стабилизированной осадке оттаивания без нагрузки, и коэффициент сжимаемости  $m$ , вычисляемый как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс.

### б) Математическое моделирование

По программе "Termoground" выполнялось двухэтапное решение: 1 - тепловая задача, в результате которой определяли температурные поля на фиксированный период времени; 2 - механическая задача с расчетом осадки грунта в процессе оттаивания и уплотнения.

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 пространстве [18].

Осадки оттаивающих грунтов в программе моделировались с использованием зависимости, предложенной М.Ф. Киселевым [19]:

$$d\varepsilon_{th} = \frac{W - W_p - K_d I_p}{\rho_w / \rho_s + W_{tot}}, \quad (1)$$

где  $I_p$  - число пластичности;  $\rho_w$  - плотность воды;  $\rho_s$  - плотность частиц грунта;  $K_d$  - коэффи-

циент уплотняемости, зависящий от дисперсности глинистого грунта и уплотняющего давления при оттаивании

$$K_d = aI_p^{-b} + c, \quad (2)$$

где  $a, b, c$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от давления.

Формула (1) применима при напряжениях 0,05...0,6 МПа и не учитывает особенностей криогенной текстуры грунтов. Расчеты выполнялись для модельных образцов массивной криогенной текстуры при нагрузке 0,1 МПа.

Для решения тепловой задачи оттаивания грунта в лабораторных условиях принималась осесимметричная схема, представляющая собой четвертую часть цилиндра радиусом 35,5 мм и высотой 35 мм и состоящая из 2000 конечных элементов.

Свойства исходных грунтов приведены в табл. 1 и 2. Теплофизические характеристики, необходимые для расчета, принимались по СП 25.13330.2012.

Воздействие температуры на грунт задавалось специальным элементом - "теплообмен по четырехугольнику". Использование данного элемента приводит к наиболее точным результатам при решении мелкомасштабных задач [20]. "Теплообмен по четырехугольнику" является граничным условием 3-его рода. Параметры элемента - температура и коэффициент теплоотдачи. Начальная температура образца принята равной  $-2^\circ\text{C}$ . На каждом шаге решения на модель воздействовала постоянная температура  $+20^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи принимался равным  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , процесс оттаивания на двухчасовом отрезке времени разбит на 96 частей (первые 1,5 ч решения через каждую минуту, оставшаяся часть через 5 мин).

Для условий одностороннего оттаивания в верхней части по плоскости взаимодействия металлического штампа с грунтом и для всестороннего оттаивания в верхней и нижней частях и по стенкам были заданы условия 3-его рода, во всех остальных - условия 2-го рода с нулевым теплотокотом (рис. 3).

После решения тепловой задачи моделировалось воздействие напряжений на грунт через штамп без возможности радиальных деформаций как при компрессии. На всем промежутке времени давление штампа на грунт задавалось постоянным и равным 0,1 МПа.

Для прогноза деформационных характеристик был смоделирован процесс испытаний мерзлых грунтов тепловым штампом [21]. Расчетная схема имеет размеры в плане  $200 \times 200$  см, мощность слоя грунта - 120 см (рис. 4). На рисунке

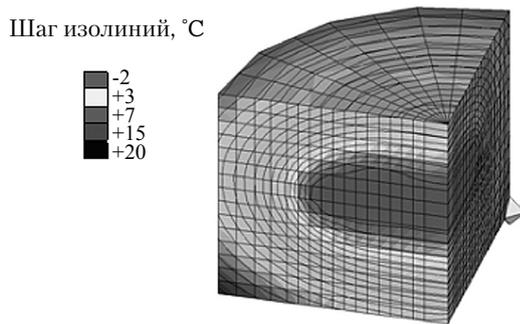


Рис. 3. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи всестороннего оттаивания

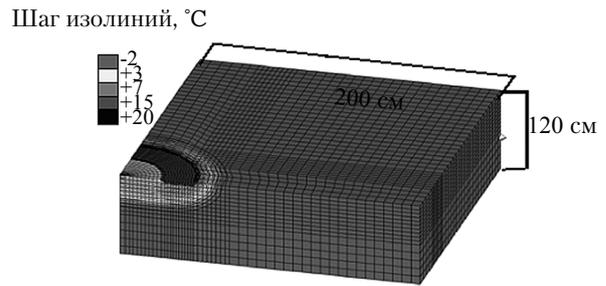


Рис. 4. Фрагмент схемы для расчета температурной задачи оттаивания под штампом

Таблица 4

№	Количество образцов	Средние значения		Коэффициент вариации $V$ , д.е.	
		$W_{\text{от}}$ , д.е.	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$W_{\text{от}}$ , д.е.	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Супесь	12	0,18	1,98	0,01	0,01
	12	0,28	1,91	0,02	0,01
Суглинок	12	0,30	1,86	0,02	0,01
	12	0,40	1,74	0,02	0,01

Таблица 5

$W_{\text{от}}$ , д.е.	одностороннее оттаивание		всестороннее оттаивание		Средние значения для обоих условий оттаивания	
	$A$ , д.е./ $m$ , МПа <sup>-1</sup>	$V$ , д.е.	$A$ , д.е./ $m$ , МПа <sup>-1</sup>	$V$ , д.е.	$A$ , д.е./ $m$ , МПа <sup>-1</sup>	$V$ , д.е.
супесь						
0,16	0,137/0,091	0,056/0,062	0,148/0,082	0,033/0,042	0,142/0,087	0,059/0,076
0,28	0,194/0,102	0,026/0,093	0,204/0,095	0,036/0,058	0,199/0,099	0,041/0,079
суглинок						
0,3	0,123/0,111	0,073/0,061	0,133/0,093	0,052/0,136	0,128/0,102	0,068/0,128
0,4	0,224/0,123	0,029/0,061	0,244/0,107	0,062/0,057	0,234/0,115	0,065/0,092

показана четверть круглого штампа, радиус которого 40 см (общая площадь 5000 см<sup>2</sup>). Штмп окружает обогревающее кольцо шириной 25 см (примерно 1/3 диаметра штампа). Температура оттаивания +20°C.

После достижения глубины оттаивания, равной 40 см (1/2 диаметра штампа), условная подача тепла в модель грунта прекращалась, и производился расчет осадок. На каждом этапе расчета считывалась температура с предыдущего этапа, которая определялась через каждые 15 мин.

**Результаты**

**а) Экспериментальные исследования**

Определение деформационных характеристик выполнялось для образцов грунтов с заданными исходными значениями плотности и влажности, эти же характеристики были приняты и при моделировании. Статистическая обработка данных как для условий одностороннего, так и всестороннего оттаивания выполнялась для двадцати четырех образцов супеси и суглинка (табл. 4).

Видно, что коэффициент вариации влажности образцов не превышал 2%, а плотности 1%.

Результаты статистической обработки опытных данных представлены в таблице 5. Рассчитывались средние значения коэффициентов оттаивания  $A$ , сжимаемости  $m$  и коэффициент вариации  $V$ , полученные при разных условиях оттаивания, а также коэффициент вариации, рассчитанный при общей оценке как одностороннего, так и всестороннего оттаивания (табл. 5).

В результате экспериментальных исследований выявлено, что коэффициенты оттаивания  $A$  при всестороннем оттаивании больше, чем при одностороннем. Максимальное отличие между ними составило для супеси 12%, суглинка 23%. При этом коэффициент вариации коэффициента оттаивания для обоих условий оттаивания не превышает 7%.

Коэффициент сжимаемости  $m$ , по данным испытаний, больше при одностороннем оттаивании, чем при всестороннем. Максимальная разница между значениями составляет для супеси 18%, суглинка 26%. Коэффициент вариации  $m$  для обоих условий оттаивания не превышает 13%, т.е. можно говорить о достаточной однородности выборки данных.

Значения деформационных характеристик удовлетворяют правилу "трех сигм" (если слу-

Таблица 6

Вид грунта	$W_{от}$ , д.е.	Условия оттаивания	Относительная деформация при напряжениях		Деформационные характеристики	
			0,1 МПа	0,3 МПа	$A$ , д.е.	$m$ , МПа <sup>-1</sup>
Супесь	0,18	1	0,028	0,043	0,020	0,076
	0,18	2	0,028	0,043	0,020	0,076
	0,28	1	0,107	0,159	0,081	0,260
	0,28	2	0,114	0,171	0,086	0,286
Суглинок	0,3	1	0,077	0,100	0,066	0,114
	0,3	2	0,084	0,109	0,071	0,124
	0,4	1	0,144	0,202	0,115	0,290
	0,4	2	0,169	0,231	0,137	0,311

Таблица 7

Вид грунта	$W_{от}$ , д.е.	Деформационные характеристики, рассчитанные для условий:			
		лабораторных		полевых	
		$A$ , д.е.	$m$ , МПа <sup>-1</sup>	$A$ , д.е.	$m$ , МПа <sup>-1</sup>
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

чайная 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 методов оттаивания (одностороннего и всестороннего). Сравнение дисперсий деформационных характеристик выполнено на основе распределения Фишера (для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ ). Вычисленные значения оказались меньше табличных, следовательно, дисперсии деформационных характеристик при разных условиях оттаивания равны.

Сравнения средних характеристик, полученных по двум методикам, выполнялись по  $t$ -критерию (распределение Стьюдента) для двух независимых выборок при равных дисперсиях. Данные  $t$ -критерия оказались меньше критического значения, что свидетельствует о равнозначности двух методик определения деформационных характеристик.

### б) Математическое моделирование

В результате моделирования рассчитаны осадки при одностороннем (1) и всестороннем (2) оттаивании. Результаты расчетов приведены в табл. 6, из которой видно, что при всестороннем оттаивании расчетные осадки на 5...20% больше, чем при одностороннем. Наибольшая разница характерна для суглинка. Для супеси при влажности 0,18 условия оттаивания практически не влияют на осадку. Это связано с влиянием формирования в грунте напряженного состояния в процессе оттаивания, от которого зависит параметр  $K_d$  в уравнении (1).

При всестороннем оттаивании грунта мерзлое ядро является концентратором напряжений (напряжения вокруг ядра превышают напряжения по поверхности стенок прибора в 3 раза), что приводит к большему уплотнению в

центре, а также перераспределению влажности. Так в центре образца влажность после всестороннего оттаивания меньше, чем у боковой поверхности. Этот эффект зафиксирован и экспериментально при исследовании распределения влажности внутри грунта после оттаивания и уплотнения в условиях компрессии. Таким образом, моделирование процессов оттаивания подтвердило, что условия оттаивания влияют на осадку грунта при оттаивании.

Для сопоставления осадок оттаивающих грунтов под воздействием теплового штампа в полевых условиях и рассчитанных по программе "Termoground" использованы данные исследований Г.М. Пахомовой [7] и В.П. Ушкалова [4].

Экспериментальные осадки, полученные как в полевых, так и лабораторных условиях, в 1,5...3 раза выше рассчитанных по программе. Это связано с не учетом в формуле (1) влияния криогенного строения и различных физико-механических процессов, протекающих при оттаивании. Однако полученные расчетные осадки позволяют качественно оценить закономерности изменения деформационных характеристик при различных условиях оттаивания и видах испытаний.

Сравнение деформационных характеристик, полученных по данным моделирования лабораторных компрессионных и полевых испытаний в условиях одностороннего оттаивания, представлены в табл. 7, из которой следует, что коэффициент оттаивания закономерно увеличивается при компрессионных испытаниях с увеличением влажности. Коэффициенты оттаивания и сжимаемости супеси с влажностью 0,18 оказались близки. Увеличение влажности как супеси, так и суглинка обуславливает увеличение деформационных характеристик до 30...50%.

### Выводы

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований, а также результатов математического моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент  $A$  в условиях всестороннего оттаивания больше по сравнению с односторон-

ним. Коэффициент  $m$  наоборот больше при одностороннем оттаивании. Это связано с влиянием напряженного состояния формирующегося в грунте в процессе оттаивания. Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных показала, что средние значения и дисперсии деформационных характеристик, полученные при разных условиях оттаивания, одинаковы, что позволяет сделать вывод о возможности использования обеих методик определения деформационных характеристик на начальной 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. При всестороннем оттаивании грунта мерзлое ядро является концентратором напряжений, что приводит к большему уплотнению образца в центре, а также перераспределению влажности. Этот эффект зафиксирован и экспериментально при исследовании распределения влажности грунта после оттаивания и уплотнения в условиях компрессии.

3. Расчетные деформационные характеристики при компрессионных испытаниях на 5...50% больше данных полевых испытаний тепловыми штампами, что обусловлено различием процесса формирования напряжения в грунте при оттаивании и уплотнении. Таким образом, перераспределение напряжений, возникающее в грунте в процессе испытаний является одним из факторов, значительно влияющих на деформационные характеристики, помимо криогенного строения, влажности, льдистости и т.д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. - М.: Высшая школа, 1973. - 446 с.
2. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. - М.: МАИК "Наука / Интерпериодика", 2002. - 426 с.
3. Kotov P.I. Impact of thawing on soil deformation // Tenth International Conference on Permafrost. - 2012. - Vol 2. - Pp. 199-205.
4. Ушкалов В.П. Исследование работы протаивающих оснований и их расчет по предельным деформациям сооружений. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 220 с.
5. Бондарев П.Д. Осадка при оттаивании льдистых грунтов поймы р. Оби в района Салехарда // Тр. ин-та мерзлотоведения, т. XIX. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - С. 70-80.
6. Порхаев Г.В., Цветкова С.Г. К вопросу об экспериментальных методах определения осадки многолетнемерзлых дисперсных грунтов. // Тр. ин-та Мерзлотоведения, Т. XIV. - М.: Изд-во АН СССР, 1958, - С.64-68.
7. Пахомова Г.М. Осадки оттаивающих грунтов в процессе консолидации // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. - М., 1980. - 24 с.
8. Докучаев В.В. Неймарк Л.И., Золотарь А.И. Взаимодействие оттаивающих оснований с фундаментами, рассматриваемыми как составные элементы конструкций // Оттаивающие грунты как основание сооружений. - М.: Наука, 1981. - С. 14-27.
9. Сорокин В.А. О достоверности результатов лабораторных компрессионных испытаний грунтов на сжимаемость при оттаивании. / Оттаивающие грунты как основание сооружений. - М.: Наука, 1981. - С. 5-13.
10. Сорокин В.А., Федосеев Ю.Г. О корреляции результатов штамповых и компрессионных испытаний мерзлых грунтов при оттаивании // "ОФМГ". - 1989. - № 4. - С. 19.
11. Федосеев Ю.Г. Экспериментальные исследования осадки оттаивающих грунтов / Оттаивающие грунты как основание сооружений. - М.: Наука, 1981. - С. 60-68.
12. Пономарев В.Д. Пути совершенствования испытаний вечномерзлых грунтов горячими штампами // Тр. ин-та ВНИИОСП им. Н.М. Герсеванова. Вып. 91. - 1990. - С. 3-36.
13. Колесов А.А. Минкин М.А. Шилин Н.А. Некоторые результаты исследований осадки оттаивающих вечномерзлых песков на севере Западной Сибири // Тр. ин-та ВНИИОСП им. Н.М. Герсеванова. - 1990. - Вып. 91. - С. 48-61.
14. Золотарь А.И., Шейнкман Д.Р. О совершенствовании методики компрессионных испытаний оттаивающих грунтов // Тр. ин-та ВНИИОСП им. Н.М. Герсеванова. - 1990. - Вып. 91. - С. 82-85.
15. Хрусталева Л.Н., Водолазкин В.М. О достоверности существующих оценок сжимаемости вечномерзлых грунтов при оттаивании // Инженерная геология. - 1987. - № 4. - С. 86-91.
16. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Numerical forecast of freezing, heave and thawing of soils under footings in three-dimensional mode // Proceeding of the fifth International symposium on permafrost engineering. Vol.1. - Yakutsk: Permafrost Institute Press, 2002. - Pp. 198-202.
17. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. - М.: Стандартинформ, 2011. - 109 с.
18. Кудрявцев С.А. Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания морозоопасных грунтов. - СПб., М.: АСВ, 2004. - 37 с.
19. Киселев М.Ф. Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением. - Л., Стройиздат, 1978. - 176 с.
20. Парамонов В.Н., Сахаров И.И., Парамонов М.В. Процессы промерзания и оттаивания при устройстве подземных и заглубленных сооружений // Жилищное строительство. - 2012. - № 9. - С. 21-23.
21. ГОСТ 20276-99. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.

.....

.....

.....