УДК 624.131.3

П.И. Котов[1], Л.Т. Роман[2], М.Н. Царапов[3]

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТТАИВАНИЯ И УПЛОТНЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ[4]

Приведены результаты лабораторных исследований влияния условий оттаивания (плоскопараллельного или всестороннего) на деформационные характеристики (коэффициент оттаивания и сжимаемости) оттаивающих грунтов (песок, супесь, суглинок) с заданными физическими свойствами массивной и слоистой криогенной текстуры. Установлено, что значения коэффициента оттаивания больше при всестороннем оттаивании, а коэффициента сжимаемости — при плоскопараллельном оттаивании. Полученные данные позволили установить применимость опытного определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов независимо от условий оттаивания.

Ключевые слова: оттаивающие грунты, коэффициент оттаивания, коэффициент сжимаемости, плоскопараллельное и всестороннее оттаивание.

The results of laboratory studies of the effect of thawing conditions (plane-parallel or three dimensional) on the deformation characteristics (thawing and compression coefficients) thawing soils (sand, sandy loam, clay loam) with desired physical properties of massive and layered cryogenic textures presented in the article. It was found that the values of the thawing coefficient bigger after three dimensional thawing, and compression coefficient after plane- parallel thawing. The obtained data allowed to establish the applicability of the experimental determination of thawing soils deformation characteristics regardless of thawing conditions.

Key words: thawing soils, thawing coefficient, compression coefficient, plane-parallel and three dimensional thawing.

Введение. Характеристики оттаивающих грунтов — исходные параметры при расчете осадок снований объектов, возводимых в криолитозоне по второму принципу (т.е. грунты основания используются в оттаявшем или оттаивающем состоянии), трубопроводов и дорог [Роман, 2002; СП 25.13330.2012, 2012; Цытович, 1973]. В последнее время получили широкое применение математические программы, основанные на методе конечных элементов, с помощью которых выполняют расчеты осадок при оттаивании, причем в этих программах также используются деформационные характеристики, полученные экспериментальным путем [Агафонов, 2010; Власов, 2010; Кудрявцев, 2004]. Поэтому необходимо уделить большее внимание методикам их определения с целью повышения достоверности расчетов, а также разработке новых подходов, которые позволят получать достоверные данные. В соответствии с накопленным опытом исследования деформационных характеристик оттаивающих грунтов выделяются два методических подхода к компрессионным испытаниям в зависимости от условий оттаивания: 1) плоскопараллельный; 2) всесторонний.

Рядом исследователей разработаны различные конструкции приборов для указанных способов испытаний. Схемы основных из них представлены на рис. 1 и 2.

Определение деформационных характеристик оттаивающих грунтов в условиях плоскопараллельного оттаивания наиболее соответствует естественному процессу оттаивания деятельного слоя с послойным уплотнения оттаивающего массива грунтов под действием природного давления. При этом соблюдается условие одномерной задачи — равномерное сжатие без возможности бокового расширения. Именно для этого случая и были разработаны методы прогноза осадок [Цытович, 1973]. Соблюдение условий плоскопараллельного оттаивания обеспечивается устройством теплоизоляции по дну и боковой поверхности приборов. Оттаивание выполняется посредством горячей воды в штампе, подаваемой через термостат, либо путем нагрева поверхности штампа.

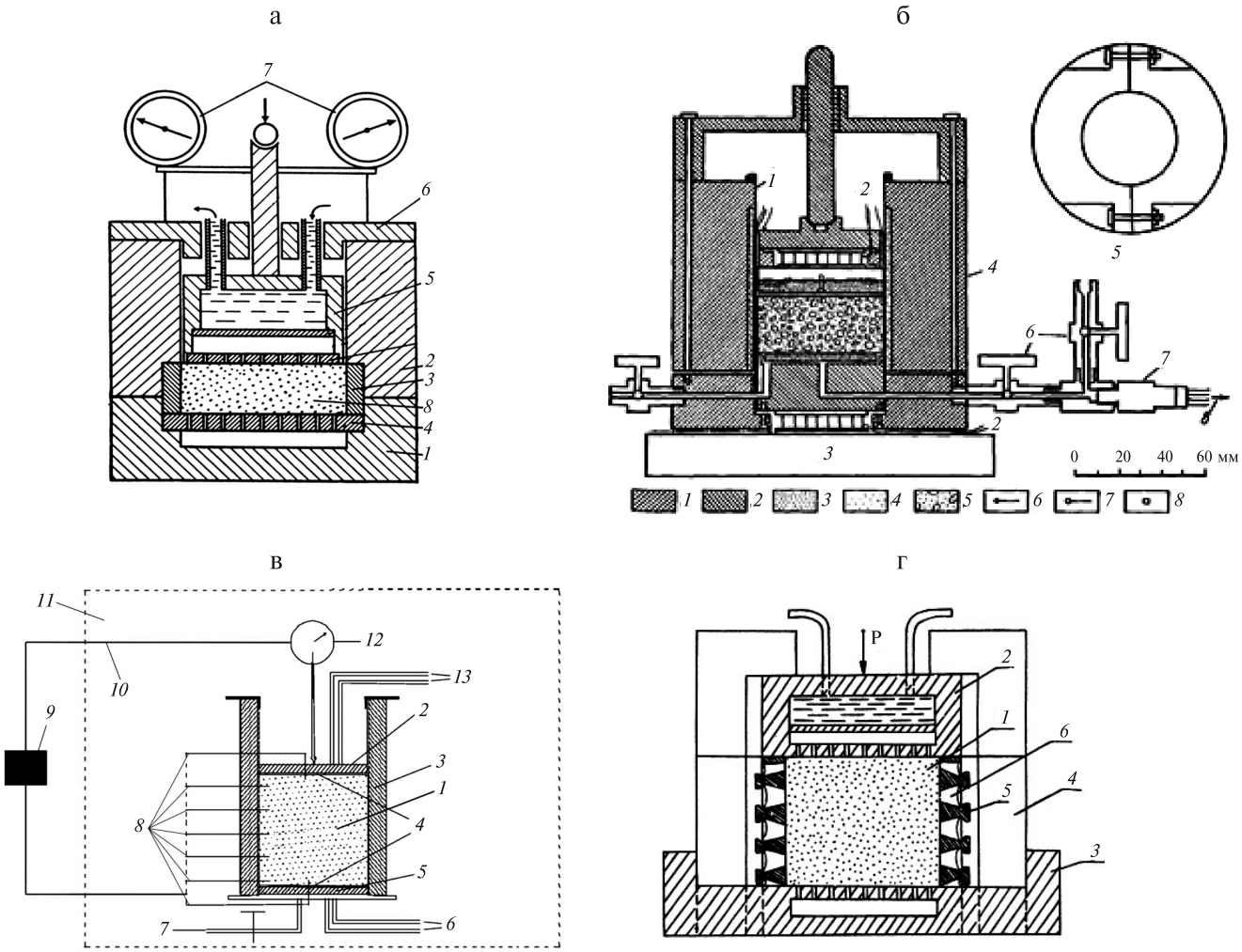
Указанные особенности усложняют конструктивное решение приборов, увеличивают период испытаний. Это приводит к тому, что при массовом определении деформационных характеристик

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail*: kotovpi@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, зав. лаб., докт. геол.-минерал. н.; *e-mail*: ltr@inbox.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail*: 2265128@mail.ru

[4] Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16-35-00227 мол_а).



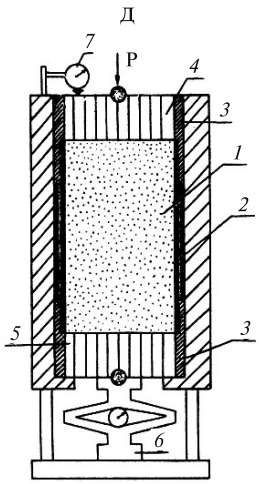


Рис. 1. Схемы приборов, обеспечивающих плоскопараллельное оттаивание: *а* — одометр, по [Цытович, 1941]: *1* — основание, *2* — направляющий цилиндр, *3* — рабочее нетеплопроводное кольцо, *4* — перфорированный диск, *5* — штамп, *6* — крышка, *7* — индикаторы, *8* — грунт; *б* — пермоуд, по [Morgenstem, 1973]: *1* — люсит, *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); *в* — одометр, по [Qi, 2008]: *1* — образец грунта, *2* — верхний штамп, *3* — корпус из плексигласа, *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; *г* — одометр с податливыми стенками, по [Ершов, 1995]: *1* — образец грунта, *2* — штамп, *3* — жесткое днище, *4* — рабочий цилиндр, *5* — металлические кольца, *6* — резиновые кольца; *д* — прибор КГ-1, по [Ершов, 1995]: *1* — образец грунта, *2* — грунтонос, *3* — переходник, *4* — коронка, *5* — нижний штамп, *6* — динамометр, *7* — индикатор

оттаивающих грунтов на стадии инженерных изысканий более приемлемы приборы с допущением всестороннего оттаивания. Отметим, что такая методика использована рядом авторов [Аткачис, 1977; Киселев, 1978; Crory, 1973]. Однако исследования, направленные на выявления сопоставления количественных значений деформационных характеристик оттаивающих грунтов, определенных по обеим методикам, практически отсутствуют.

Расхождения в получаемых результатах могут быть обусловлены разной скоростью оттаивания, влиянием граничных условий оттаивания на формирование структуры, текстуры, плотности и влажности при оттаивании и уплотнении.

Методика исследования. Исследования выполняли на двух типах приборов [Kotov, 2015]. Прибор, обеспечивающий плоскопараллельное оттаивание, включал изоляцию боковой поверхности и нижнего торца нетеплопроводным материалом капролоном. Толщина изоляционного слоя составляла 30 мм. В приборе для всестороннего оттаивания теплоизоляция отсутствовала. Образцы

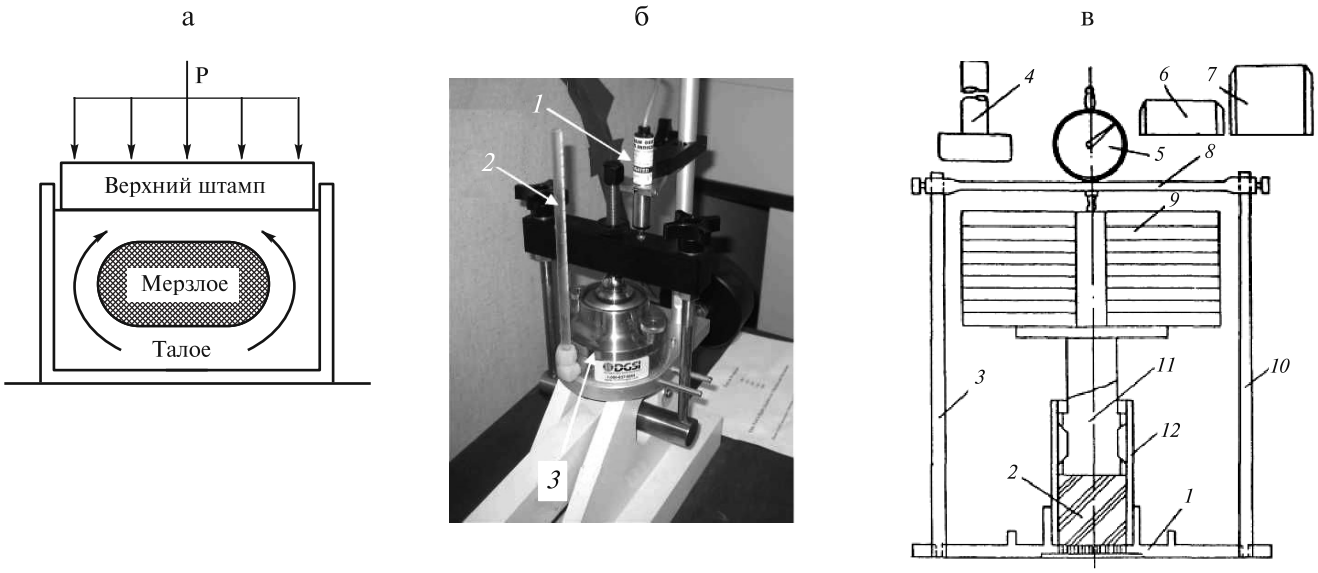


Рис. 2. Схемы приборов, обеспечивающих всестороннее оттаивание грунтов: а — консолидомер, по [Crory, 1973]; б — консолидомер, по [Paudel, 2009] (*1* — датчик деформации, *2* — трубка, *3* — одометр); в — прибор относительной просадочности, по [Аткачис, 1977] (*1* — пята-подставка; *2* — керн мерзлого грунта; *3* — левая стойка; *4* — толкатель; *5* — индикатор; *6*, *7* — пробоотборники; *8* — перекладина; *9* — груз; *10* — правая стойка; *11* — штамп; *12* — цилиндр для керна)

диаметром 70,1 мм и высотой 35 мм помещали в металлическое кольцо. Поровая влага, образующаяся при оттаивании, отфильтровывалась только через перфорированный верхний штамп.

Методика испытаний сводилась к следующему. Приборы устанавливали в холодильной камере, имеющей температуру −2 °С. Образцы грунта в мерзлом состоянии помещали в приборы и загружали первой ступенью нагрузки 0,025 МПа либо 0,1 МПа для глинистых грунтов и 0,2 МПа — для песчаных. Под указанной нагрузкой наблюдали за осадкой образцов в мерзлом состоянии до условной стабилизации, равной 0,01 мм за 12 ч. Затем холодильную камеру отключали, и под действием этой же нагрузки происходило полное оттаивание образцов до указанного выше значения стабилизированной осадки. Затем выполнялось уплотнение образца ступенями возрастающей нагрузки. Приращение нагрузки на каждой ступени составляло 0,05 МПа для глинистых грунтов и 0,075 МПа для песчаных. Каждая ступень нагрузки также выдерживалась до условной стабилизации осадки [ГОСТ 12248-2010, 2011].

По результатам испытаний построены графики зависимости относительной осадки (ε) на каждой ступени нагрузки (σ_i) от времени (t) (рис. 3 а) и условно стабилизированной осадки ($\varepsilon_{ст}$) от напряжения (σ_i) (рис. 3, *б*). Определялся коэффициент оттаивания (A_{th}), равный относительной стабилизированной осадке оттаивания и уплотнения под первой ступенью нагрузки. По наклону графика $\varepsilon_{ст}$ — σ рассчитывали коэффициент сжимаемости (m).

В каждом опыте использовали 3 образца с одинаковыми влажностью и плотностью. Были изготовлены образцы с массивной и слоистой криогенной текстурой.

Образцы с массивной криогенной текстурой замораживали в холодильной камере с температурой −10 °С и выдерживали в течение суток. Слоистая текстура создавалась путем послойного добавления воды на мерзлую поверхность грунта. Исследовали образцы с одним шлиром толщиной 2 мм и с 3 шлирами толщиной 0,065 мм. При этом влажность для всех образцов была одинаковая. Для слоистых криогенных текстур это достигалось за счет уменьшения влажности минеральных прослоев.

Состав и физические свойства грунтов. Экспериментальные исследования влияния условий оттаивания на деформационные характеристики оттаивающих грунтов проводили на модельных образцах нарушенного сложения, отобранных в

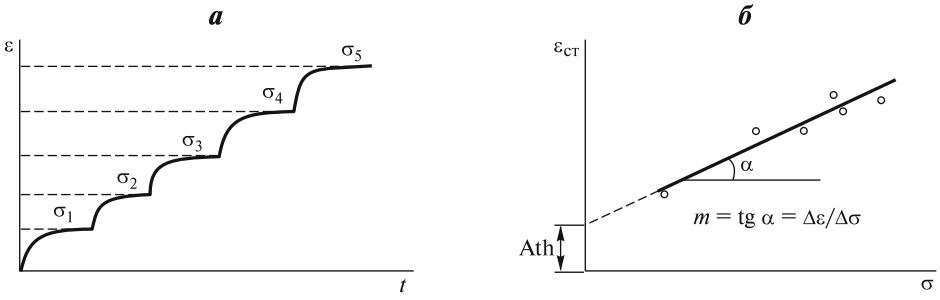


Рис. 3. Зависимости развития относительной осадки от времени при каждой ступени нагружения (*а*) и стабилизированной осадки от напряжения (*б*)

Таз-Енисейской области с глубины до 5 м. Исследовали три вида грунта — песок, супесь, суглинок:

– песок кварцевый позднеплейстоценового возраста прибрежно-морского генезиса (кацанцевская свита, pm Q_{III} kz), темно-серого цвета, хорошо сортированный. Плотность твердого компонента 2,65 г/см^3;

– супесь среднеплейстоценового возраста морского, ледниково-морского генезиса (салехардская свита, m,gm Q_{II} sh), коричневого цвета. Плотность твердого компонента 2,69 г/см^3. Нижний предел пластичности равен 0,136 долей единицы (д.е.), а число пластичности — 0,048 д.е.;

– суглинок среднеплейстоценового возраста морского, ледниково-морского генезиса (салехардская свита, m,gm Q_{II} sh), серого цвета. Плотность твердого компонента 2,71 г/см^3. Нижний предел пластичности равен 0,20 д.е., а число пластичности — 0,095 д.е.

Гранулометрический состав определялся ареометрическим методом (табл. 1). Диапазон изменения влажности и плотности для песчаных и глинистых модельных образцов задавали в соответствии с их предельными значениями, полученными по данным лабораторных исследований грунтов ненарушенной структуры.

Таблица 1

Гранулометрический состав исследованных грунтов

Содержание частиц в каждой фракции, %							Название грунтов*
диаметр частиц, мм							
1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	<0,002	
1	4	63	14	10	8	0	песок пылеватый
1	4	10	32	23	28	2	супесь пылеватая
1	1	10	15	20	33	20	суглинок легкий пылеватый

* По [ГОСТ 25100-2010, 2011].

В связи с тем, что значения деформационных характеристик оттаивающих грунтов обусловлены в основном исходными значениями плотности и влажности [Kotov, 2013], статистическая обработка показателей свойств грунтов показала, что коэффициент вариации для влажности не превышает 3%, а плотности — 1%. Это позволяет выявить общие закономерности влияния только условий оттаивания на деформационные характеристики.

Результаты экспериментальных исследований. Результаты статистической обработки полученных значений деформационных характеристик представлены в табл. 2. При этом рассчитывались средние значения и коэффициент вариации каждой деформационной характеристики, полученные при разных условиях оттаивания.

Таблица 2

Результаты статистической обработки значений опытных средних величин деформационных характеристик и коэффициента вариации

W, д.е	Криогенная текстура	Нагрузка при оттаивании, МПа	Значения при оттаивании			
			плоскопараллельном		всестороннем	
			A_{th}, д.е./*m*, МПа$^{-1}$	V_{Ath}/V*m*	A_{th}, д.е./*m*, МПа$^{-1}$	V_{Ath}/V*m*
Песок						
0,18	массивная	0,2	0,075/0,032	6/7	0,075/0,031	5/7
		0,025	0,062/0,047	4/12	0,062/0,047	8/9
0,25		0,2	0,105/0,038	5/5	0,107/0,037	4/8
		0,025	0,083/0,051	5/3	0,087/0,052	5/5
Супесь						
0,18	массивная	0,1	0,145/0,091	6/6	0,152/0,082	3/8
		0,025	0,128/0,171	3/6	0,128/0,164	2/6
0,28		0,1	0,202/0,102	2/9	0,208/0,095	4/8
		0,025	0,183/0,197	4/7	0,184/0,188	8/8
	слоистая; 1 шлир	0,1	0,192/0,088	7/7	0,203/0,08	4/9
		0,025	0,181/0,176	4/6	0,183/0,164	2/7
	слоистая; 3 шлира	0,1	0,187/0,088	5/5	0,193/0,079	3/9
		0,025	0,175/0,174	7/8	0,182/0,162	3/8
Суглинок						
0,3	массивная	0,1	0,131/0,111	7/6	0,14/0,093	5/13
		0,025	0,109/0,204	5/6	0,112/0,18	9/10
0,4		0,1	0,231/0,123	3/6	0,251/0,107	9/9
		0,025	0,214/0,245	5/7	0,22/0,237	7/6
	слоистая; 1 шлир	0,1	0,207/0,115	7/8	0,233/0,105	4/8
		0,025	0,196/0,239	5/6	0,213/0,206	5/9
	слоистая; 3 шлира	0,1	0,198/0,111	5/11	0,225/0,103	6/7
		0,025	0,194/0,203	4/7	0,197/0,191	5/6

В результате экспериментальных исследований выявлено, что значения коэффициента оттаивания при всестороннем оттаивании больше, чем при плоскопараллельном. Максимальное отличие между ними составляет для песка 16%, для супеси 19%, для суглинка 27%. При этом коэффициент вариации коэффициента оттаивания для обоих условий оттаивания не превышал 9%.

Коэффициент сжимаемости по данным испытаний в основном больше при плоскопараллельном оттаивании, чем при всестороннем. Максимальная разница между значениями составляет для

песка 19%, для супеси 24% и для суглинка 33%. При этом коэффициент вариации коэффициента сжимаемости для обоих условий оттаивания не превышал 13%.

Таким образом, можно сделать вывод, что условия оттаивания влияют на значения коэффициентов сжимаемости и оттаивания, но коэффициент вариации деформационных характеристик не превышает 15%.

Анализ данных показал, что полученные значения деформационных характеристик соответствуют нормальному закону распределения, поэтому мы использовали критерии сравнения математических ожиданий и дисперсий для двух методик (плоскопараллельного и всестороннего оттаивания).

Для сравнения дисперсий использован критерий, основанный на распределении Фишера (F-критерий) [Спирин, 2004]. Рассчитанные значения критерия Фишера для всех грунтов для уровня значимости α=0,05 получились меньше табличного, поэтому можно сделать вывод, что дисперсии полученных деформационных характеристик при разных условиях оттаивания равны.

Для сравнения двух средних значений использовался *t*-критерий (распределение Стьюдента) для двух независимых выборок данных при равных дисперсиях. Полученные значения *t*-критерия меньше критического значения для всех видов грунтов. Статистическая обработка данных позволяет сделать вывод о равнозначности двух методик определения деформационных характеристик.

Обсуждение результатов. Из внешних факторов наибольшее влияние на деформационные характеристики оказывает скорость оттаивания. Экспериментальными исследованиями установлено, что при скорости оттаивания, превышающей 1,5 см/ч, происходит деформация грунта за счет объемных фазовых изменений при переходе льда в воду, а также преобразование структуры и текстуры (смыкание макропор) при консолидации оттаивающего грунта. Уменьшение скорости оттаивания приводит к развитию различных физико-химических процессов (сегрегационному льдовыделению, усадке, набуханию), что влияет на значения деформационных характеристик [Ершов, 1985]. Поэтому, чтобы уменьшить число факторов, влияющих на значения осадки, исследования проводили при скорости более 1,5 см/ч.

Анализ данных табл. 2 показывает, что разное распределение льда в образцах при одинаковой суммарной влажности влияет на значения коэффициента оттаивания и сжимаемости. Коэффициент оттаивания и сжимаемости уменьшается с увеличением количества шлиров в связи с образованием макропор, которые полностью не разрушаются и концентрируют влагу. Эти отличия, возможно, связаны с особенностями методики изготовления образцов, заключающейся в послойном намораживании, т.е. чем больше шлиров, тем больше неровностей и пустот могло быть на контакте лед — грунт, что в значительной степени могло повлиять на значения деформационных характеристик [Котов, 2014].

Значение давления при оттаивании влияет на коэффициент сжимаемости, который изменяется почти в 2 раза для глинистых грунтов, а для песчаных грунтов эти отличия не превышают 30%. Сжимаемость оттаивающих дисперсных грунтов определяется первоначальными значениями физических характеристик (плотность, суммарная влажность) после оттаивания, значения которых, как показали проведенные экспериментальные исследования, отличаются при разных способах оттаивания.

По результатам экспериментальных исследований при всестороннем оттаивании осадка на 5–20% больше, чем при плоскопараллельном. Наибольшая разница характерна для суглинка, а для песка условия оттаивания практически не влияют на значения осадок. Отличия обусловлены неравномерностью распределения напряжения в грунте в процессе оттаивания. Так, при всестороннем оттаивании грунта мерзлое ядро представляет собой концентратор напряжения, так как напряжение вокруг ядра превышает напряжение у стенок в 3 раза (по данным расчета в программе Termoground), что приводит к большему уплотнению образца в центре [Kotov, 2015]. Оттаивание в песке происходит быстрее, чем в глинистых грунтах, поэтому влияние мерзлого ядра здесь слабее.

Заключение. Таким образом, в условиях заданных равнозначных значений начальной влажности 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 разное поведение грунтов при оттаивании обусловливает отличия деформационных характеристик при различных условиях оттаивания. Полученные данные статистической обработки результатов испытаний показали возможность применения всестороннего оттаивания при определении деформационных характеристик в лабораторных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агафонов А.В., Ворков В.А. Использование конечноэлементного анализа для расчета на прочность подземных трубопроводов с учетом тепловых деформаций грунтов // Изв. Самарского НЦ РАН. 2010. Т. 12, № 4(3). С. 535–539.

Аткачис В.С. Методика инженерно-геологических изысканий на участке Чара–Тында // Транспортное строительство. 1977. № 10. С. 12–17.

Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г., Тропкин С.Н. Некоторые особенности геотехнического моделирования с помощью SIMULIA ABAQUS // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерные системы-2010». М.: Изд-во РУДН, 2010. С. 78–88.

ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 109 с.

Ершов Э.Д. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 167 с.

Ершов Э.Д., Роман Л.Т. Методы определения механических свойств мерзлых грунтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 161 с.

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

Котов П.И. Компрессионное деформирование прибрежно-морских мерзлых грунтов при оттаивании (европейский север России, Западная Сибирь): Автореф. канд. дисс. М., 2014. 23 с.

Кудрявцев С.А. Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания морозоопасных грунтов. СПб.: АСВ, 2004. 37с.

Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. 426 с.

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: ФЦС, 2012. 52 с.

Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург: изд. ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. 257 с.

Цытович Н.А. К расчету осадок фундаментов на оттаивающих грунтах // Тр. ЛИСИ. 1941. Вып. 3. С. 15–21.

Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.

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

Kotov P.I. Codification of deformation characteristics of thawing soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Vol. 50(3). P. 123–127.

Kotov P.I., Roman L.T., Sakharov I.I. et al. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2015. Vol. 52(5). P. 254–261.

Morgenstem N.R., Smith L.B. Thaw-consolidation tests on remoulded clays// Canad. Geotechn. J. 1973. Vol. 10. P. 25–39.

Paudel B., Wang, B. Coefficient of consolidation of the soils from the Mackenzie valley, Canada // 62nd Canad. Geotechn. Conference. Halifax, 2009. P. 67–73.

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

Поступила в редакцию
12.05.2016