

СТАТЬЯ

УДК 551.345

DOI 10.17513/use.38045

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ****Калабина М.В.***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва,
e-mail: kalabina.mariya@yandex.ru*

В статье рассматриваются оттаивающие грунты как современное актуальное направление исследований в области инженерной геокриологии и механики грунтов. Приведены свойства оттаивающих грунтов, выявлены их сходства и различия с тальми и мерзлыми грунтами, а также выделены их собственные специфические особенности. Установлены основные факторы, определяющие процесс оттаивания, и их взаимное влияние. Исследования механических свойств грунтов проводились по стандартным методикам. Для создания простого напряженно-деформированного состояния выбраны компрессионные и сдвиговые испытания, для создания сложного напряженно-деформируемого состояния использован метод трехосного сжатия. Оттаивающие грунты как отдельное направление исследований рассматриваются относительно недавно, и нормативные документы по определению их деформируемости и прочности еще находятся на стадии разработки. Для исследования свойств оттаивающих грунтов методом трехосного сжатия была предложена новая методика, разработанная на основе теоретических знаний, экспериментальных данных и уже существующих нормативных документов для талых и мерзлых грунтов. В статье описаны результаты лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов при оттаивании при различных видах нагружения, проведено их сравнение. В ходе исследований установлены особенности поведения оттаивающих грунтов при нагружении.

Ключевые слова: оттаивающие грунты, напряженно-деформируемое состояние, деформируемость грунтов, прочность грунтов, трехосное сжатие оттаивающих грунтов

**LABORATORY STUDIES
OF MECHANICAL PROPERTIES OF THAWING SOILS****Kalabina M.V.***Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: kalabina.mariya@yandex.ru*

The article represented thawing soils as modern actual science research direction in engineering geocryology and soils mechanic. The article review thawing soils properties describe similarities and differences between melt and frozen soils and underline their own specific features. We indicate the main factors and their combination defining thawing process. We use standard methods to define mechanical properties of soils. Compression and shear tests are used to create simple one-dimensional stress-strain; and triaxial tests – to complex volumetric stress-strain. Thawing soils is new science direction and standard document are under the stage of development. The article represented new method of conducting triaxial tests on thawing soils, based on theoretical knowledge, experimental data and state standards for melt and frozen soils. The article describes and compare the results of laboratory research of physical and mechanical properties of thawing soils in various loading types. We represent the experimental data of deformation and strength of thawing soils under conditions of simple and volumetric stress state.

Keyword: thawing soils, stress-strain state, soil deformation, soil strength, triaxial tests on thawing soils

Оттаивающие грунты – частое и распространенное явление при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений в криолитозоне и вне ее. Оттаивающие грунты представляют собой высокодинамичные системы, которые постоянно находятся в неравновесном состоянии, и любое, даже незначительное внешнее воздействие – температурное или механическое – способно вывести эту систему из равновесия [1]. Установление закономерностей поведения таких грунтов осложнено многообразием сочетания влияющих факторов, определяющих процессы в грунтах. Вклад некоторых факторов, а также их сочетание невозможно оценить не только количественно, но иногда и качественно [2, 3]. К таким факторам относятся гранулометрический и ми-

неральный состав, криогенное строение, теплофизические и физико-химические характеристики, структурно-текстурные особенности, внешние условия и т.д. В дополнение к этому происходит постоянное изменение параметров системы в связи с протеканием различных внутренних процессов. Также оттаивающие грунты сочетают в себе признаки мерзлых и талых грунтов, при этом одновременно и существенно отличаясь от них. Поведение оттаивающих грунтов определяется главным образом содержанием и распределением льда и воды в их составе [4]. Лед, особенности его расположения, его количество и его изменения и перемещения при повышении температуры определяют физические свойства и механическое поведение грунтов при оттаива-

нии. В процессе оттаивания льда мерзлый прочный грунт с льдо-цементационными кристаллизационными связями между частицами [1] может переходить в полужидкие грунтовые массы, со значительным количеством воды. Количество льда и воды играет определяющую роль в процессе деформирования и потери прочности грунта при оттаивании [5, 6].

Также оттаивающие грунты имеют и свои специфические особенности, это пониженная плотность, повышенная влажность, избыточное поровое давление, повышенная водопроницаемость, наличие следов первичного криогенного строения. В связи с этим использование норм проектирования для мерзлых и талых грунтов в случае оттаивающих грунтов применимо только для решения ограниченного круга вопросов.

В инженерной практике свойства оттаивающих грунтов долгое время не учитывались [5] и исключались из рассмотрения в связи с их высокой деформируемостью и низкой несущей способностью по сравнению с мерзлыми и талыми грунтами, а следовательно, и их непригодностью к использованию в качестве основания сооружения. Однако интенсивное освоение территорий Арктики – развитие нефтегазовой промышленности и транспортной сети [6, 7], а также переход к повсеместному строительству, без исключения участков со сложными инженерно-геологическими условиями, привели к выделению данного направления исследований. И начиная с 2000-х гг. идет интенсивное рассмотрение данного вопроса. Кроме того, актуальность данного направления исследований связана с повышением интереса к проблеме изменения климата [8, 9], обеспечения устойчивости, а также адаптации существующей инфраструктуры Севера.

Основная цель работы заключается в установлении закономерностей поведения

грунтов в различных инженерно-геокриологических обстановках. Достоверный прогноз деформируемости и несущей способности грунтов оснований требует определения напряженно-деформируемого состояния грунтов в мерзлом, талом и оттаивающем состоянии. Таким образом, заблаговременное определение особенностей поведения грунтов в новом и переходном (оттаивающем) состоянии позволит избежать катастрофических инженерных проблем.

Установление закономерностей механического поведения оттаивающих грунтов возможно только на основе экспериментальных данных с упором на теоретические знания в области механики грунтов и инженерной геокриологии. В связи с этим разрабатываются новые методики лабораторного определения параметров и установления механического поведения грунтов.

Материалы и методы исследования

В природном массиве грунты в каждой точке всегда подвергаются воздействию различных по величине и направлению сил.

Исследования напряженно-деформированного состояния оттаивающих грунтов проводят в условиях простого и сложного нагружения. При простом нагружении проводят компрессионные испытания и опыты на сдвиг [10–13], при сложном нагружении – испытания на трехосное сжатие [10]. Испытания проводились в лаборатории механики грунтов кафедры геокриологии МГУ в 2022–2023 гг.

Метод компрессионных испытаний и метод определения сопротивления сдвигу являются достаточно простыми, широко распространенными, известными и закрепленными в нормативных документах методами испытаний [5, 10, 14, 15]. Примеры представления данных испытаний приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2.

Таблица 1

Данные компрессионных испытаний оттаивающих грунтов (суглинок, при влажности $W = 25\%$)

Суглинок		$W = 25\%$			
№	σ , МПа	ϵ , д.е.	A, д.е.	a, МПа-1	E, МПа
0	0	0	0,124	0,110	3
1	0,050	0,081			
2	0,100	0,093			
3	0,150	0,100			
4	0,200	0,120			
5	0,250	0,125			

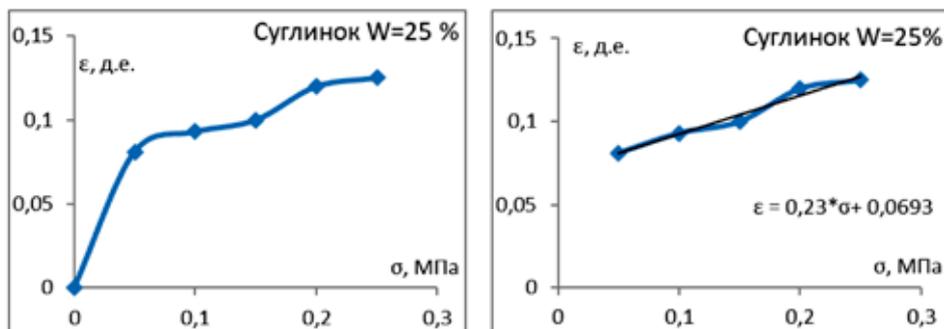


Рис. 1. График зависимости относительной деформации образца суглинка ($W = 25\%$) от нагрузки в компрессионном приборе

Таблица 2

Данные испытаний на сдвиг оттаивающих грунтов (суглинок, при влажности $W = 25\%$)

Суглинок	$W = 25\%$		
σ , МПа	τ , МПа	ϕ , град	c , МПа
0,050	0,054	23,0	0,034
0,100	0,070		
0,150	0,092		

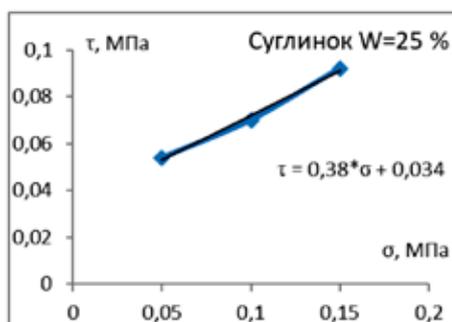


Рис. 2. График зависимости сопротивления срезу оттаивающего суглинка ($W = 25\%$) от нормального давления в опытах на сдвиг

Грунтовый массив в естественных условиях характеризуется сложным объемным напряженным состоянием. Для воссоздания таких условий в лаборатории использовался стабилометр (рис. 3). Сложное НДС моделировалось в камере прибора трехосного сжатия, приложением на образец объемных и вертикальных сил. Данный метод испытаний для оттаивающих грунтов является новым, он еще не стандартизирован и не нормирован. Таким образом, для испытаний оттаивающих грунтов разработана и пред-

ложена новая методика, в основе которой лежат принципы, теоретические знания и технические требования уже существующих нормативов.

Для наиболее точного моделирования процесса оттаивания в камере трехосного сжатия для проведения испытаний выбрана схема неконсолидированного-недренированного испытания. Особенностью данной схемы является то, что в камере прибора проводилось одновременное оттаивание и нагружение грунтового образца без уплотнения грунта и без оттока влаги. Характер деформирования и разрушения грунтового образца в процессе испытаний приведен на рис. 4.

Испытания проводились на модельных искусственных грунтах, изготовленных из пасты с заданными показателями влажности и плотности. Для проведения опытов выбраны грунты трех видов: пески, супеси, суглинки – каждый из которых испытывался при двух значениях влажности. Образцы изготавливались цилиндрической формы высотой 100 мм и диаметром 50 мм. Размеры образцов выбраны исходя их технических особенностей прибора, условий испытания (всесторонняя нагрузка на образец передавалась водой с температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, испытание проводилось на изначально мерзлом образце вне морозильной камеры). В процессе опыта проводилось оттаивание и разрушение образцов грунта. Начальная температура грунтовых образцов составляла минус $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Процесс оттаивания начинался уже с подготовки грунтового образца и установки его в камеру трехосного прибора. На первом этапе опыта воссоздавалось природное напряженно-деформируемое состояние – проводилось всестороннее обжатие образца грунта.

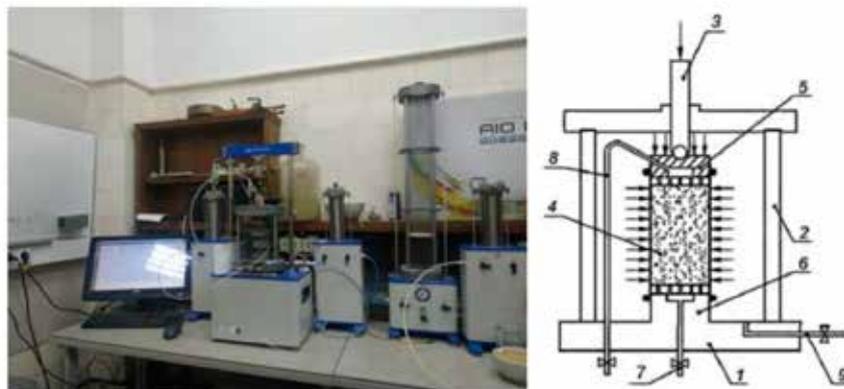


Рис. 3. Прибор для испытания грунта методом трехосного сжатия:
 1 – основание камеры; 2 – корпус камеры, 3 – шток; 4 – образец грунта в оболочке; 5 – верхний штамп; 6 – нижний штамп; 7, 8 – системы дренажа; 9 – магистраль давления в камере [10]

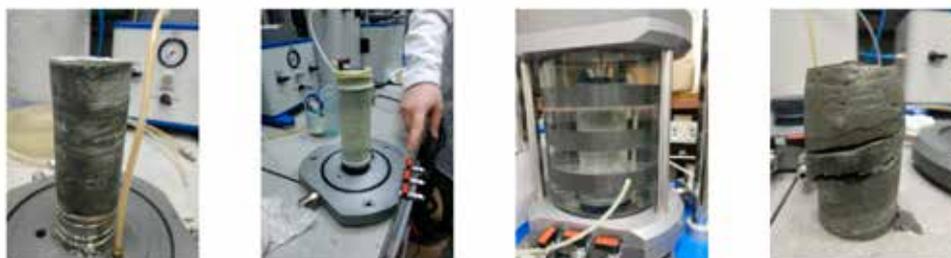


Рис. 4. Образец грунта в процессе испытания на трехосное сжатие

Давление реконсолидации при этом выбрано в соответствии с ГОСТ [10], равное полному вертикальному давлению от собственного веса в точке грунтового массива – выбрана средняя глубина слоя сезонного оттаивания – 2,5 м. Время реконсолидации составляло в среднем 30 мин. Оно установлено экспериментально на основе данных о теплофизических свойствах и среднем времени оттаивания грунтовых образцов заданного размера.

На втором этапе проводилось разрушение образца грунта приложением постоянной вертикальной нагрузки со скоростью 0,35 мм/мин. Данная скорость также была установлена экспериментально, на основе данных по времени оттаивания образцов и

данных нормативных документов [10, 11]. В ходе всего испытания контролировались такие параметры, как температура, всесторонняя и вертикальная нагрузка, поровое давление, вертикальные и объемные деформации. В результате в ходе обработки данных получены данные по деформируемости и прочности грунтов, результаты приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Таким образом, для определения прочностных и деформационных характеристик были проведены испытания оттаивающих грунтов при простом и сложном нагружении: простое нагружение включало в себя такие методы, как компрессия и сдвиг; сложное нагружение – испытания методом трехосного сжатия.

Таблица 3

Данные испытаний оттаивающих грунтов на трехосное сжатие (суглинок, при влажности $W = 25\%$)

Суглинок	W = 25%			
Модуль общей деформации	Параметр	Параметр	Удельное сцепление	Угол внутреннего трения
E0, МПа	M	N	C, МПа	φ, град
6	0,115	2,399	0,037	27

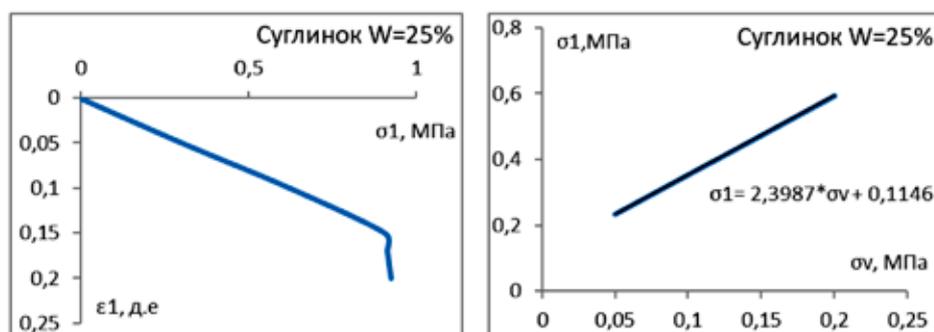


Рис. 5. Результаты испытаний грунтов на трехосное сжатие для суглинка при $W = 25\%$:
 А. График зависимости вертикальной относительной деформации ϵ_1 от разницы вертикального и объемного напряжений $\sigma_1 - \sigma_v$;
 Б. График зависимости вертикальных напряжений σ_1 от объемных σ_v

Таблица 4

Физические свойства исследуемых грунтов

Вид грунта	Плотность ρ , г/см ³	Плотность твердых частиц грунта, ρ_s , г/см ³	Влажность на пределе раскатывания, W_p , д.е.	Влажность на пределе текучести, W_l , д.е.
Супесь	1,98	2,70	0,140	0,200
Суглинок	1,98	2,71	0,180	0,280
			Полная влагоемкость W_{tot} , д.е.	
Песок	1,98	2,66	0,250	
Вид грунта	Плотность ρ , г/см ³	Плотность твердых частиц грунта ρ_s , г/см ³	Влажность на пределе раскатывания W_p , д.е.	Влажность на пределе текучести W_l , д.е.
Супесь	1,98	2,70	0,140	0,200
Суглинок	1,98	2,71	0,180	0,280
			Полная влагоемкость W_{tot} , д.е.	
Песок	1,98	2,66	0,250	

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе проведения лабораторных испытаний были выявлены закономерности изменения прочностных и деформационных свойств в зависимости от вида грунта (дисперсности) и его влажности; а также рассмотрен вид нагружения, выделены преимущества и недостатки лабораторных методов исследования. Физические свойства грунтов приведены в табл. 4.

При проведении компрессионных испытаний установлено увеличение коэффициента оттаивания и увеличение модуля деформации в ряду песок – супесь – суглинок. Также при увеличении влажности наблюдается увеличение коэффициента оттаивания, коэффициента сжимаемости и модуля

деформации. Результаты компрессионных испытаний приведены в табл. 5.

Компрессионные испытания просты в проведении и позволяют в короткие сроки оценить деформационные свойства исследуемых грунтов. Но они имеют несколько недостатков – неучет трения грунта о боковые стенки одометра и неравномерное распределение

При проведении сдвиговых испытаний получено, что с увеличением влажности показатели прочности уменьшаются. В ряду песок – супесь – суглинок прослеживается закономерность снижения угла внутреннего трения и увеличение сцепления. Угол внутреннего трения уменьшается, так как уменьшаются силы трения грунтовых частиц за счет уменьшения размеров частиц и увеличения количества контактов между ними.

Таблица 5

Результаты компрессионных испытаний оттаивающих грунтов

Грунт	Влажность	Коэффициент оттаивания	Коэффициент сжимаемости	Модуль деформации
	W, д.е.	A, д.е.	a, МПа-1	E, МПа
Песок	0,150	0,06	0,07	11
	0,250	0,08	0,04	18
Супесь	0,140	0,03	0,13	6
	0,200	0,08	0,12	7
	0,250	0,18	0,15	7
Суглинок	0,180	0,05	0,32	3
	0,250	0,12	0,11	3
	0,280	0,08	0,21	4

А увеличение сцепления происходит, так как увеличивается количество связанной воды в исследуемых грунтах при переходе от песков к супесям и суглинкам. Сцепление грунтов уменьшается более интенсивно с увеличением дисперсности, в то время как трение между частицами растет пропорционально возрастанию касательного напряжения. Получаемые в ходе опытов на сдвиг параметры минимальны для данного грунта, поскольку срез происходит в наиболее ослабленной и наиболее обводненной зоне, но в природном массиве могут быть более высокие значения прочностных характеристик, так как при простом нагружении нет бокового и объемного нагружения. Также недостатком данного метода является неравномерное распределение напряжений в грунтовом образце, сопровождающееся его местным смятием. Зазор между кольцами не всегда совпадает с толщиной скашиваемой зоны образца. Основная сложность данного метода заключается в правильном выборе момента приложения сдвигающего усилия, поскольку постоянно изменяется величина оттаявшего слоя и положение границы талый – мерзлый слой. Результаты испытаний на сдвиг приведены в табл. 6.

При оценке результатов экспериментов на трехосное сжатие выявлены те же закономерности изменения параметров прочности и деформируемости, что и при простом нагружении. Но установлены некоторые расхождения в значениях параметров. Метод трехосного сжатия оттаивающих грунтов является перспективным, так как в процессе испытаний возможно определить и прочностные, и деформационные показатели свойств. Но методика проведения опытов требует доработок и закрепления в государственных стандартах. Результаты испы-

таний грунтов методом трехосного сжатия приведены в табл. 7.

Таблица 6

Результаты испытаний оттаивающих грунтов на сдвиг

Грунт	Влажность	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление
	W, д.е.	φ, град	c, МПа
Песок	0,150	39	0,008
	0,250	35	0,003
Супесь	0,140	32	0,038
	0,200	24	0,036
	0,250	21	0,026
Суглинок	0,180	29	0,046
	0,250	23	0,034
	0,280	22	0,031

В ходе испытаний установлено, что механические свойства функционально связаны с дисперсностью, влажностью и плотностью грунтов. При повышении дисперсности грунтов (при переходе от песков к суглинкам) происходит уменьшение модуля деформации от 15 до 4 МПа, уменьшение угла внутреннего трения от 38° до 23°, увеличение сцепления от 0,005 до 0,035 МПа. При увеличении влажности происходит увеличение модуля деформации: для песков от 12 до 19 МПа, для супесей – от 7 до 9 МПа, для суглинков от 4 до 6 МПа; уменьшение угла внутреннего трения: для песков от 39° до 35°, для супесей – от 32° до 21°, для суглинков от 30° до 23°; и уменьшение сцепления в песках от 0,009 до 0,030 МПа, в супесях – от 0,040 до 0,030 МПа, в суглинках – от 0,045 до 0,031 МПа.

Таблица 7

Результаты испытаний оттаивающих грунтов на трехосное сжатие

Грунт	Влажность	Модуль деформации	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление
	W, д.е.	E, МПа	φ , град	c, МПа
Песок	0,150	12	41	0,010
	0,250	20	37	0,005
Супесь	0,140	7	34	0,042
	0,200	9	27	0,039
	0,250	9	24	0,030
Суглинок	0,180	5	32	0,049
	0,250	6	27	0,037
	0,280	7	25	0,035

В целом при использовании схем простого и сложного нагружения получены схожие показатели свойств. Но при испытаниях грунтов методом трехосного сжатия получены более высокие значения параметров. Так, модуль деформации выше, чем при компрессии, что связано с тем, что в данном случае на грунт действует всесторонняя объемная нагрузка, т.е. воздействуют большие величины напряжений. Прочностные параметры также выше, так как при трехосном испытании разрушение фиксируется во всем объеме грунтового образца, тогда как при срезе плоскость сдвига фиксированная и проходит по наиболее слабой переувлажненной зоне. Но различия в значениях параметров незначительные, что доказывает целесообразность использования методов простого и сложного нагружения в лабораторных условиях.

Заключение

В ходе работ подтверждено наличие специфических свойств оттаивающих грунтов, влияющих на их механическое поведение. Были рассмотрены различные методики проведения лабораторных испытаний, выявлены их преимущества и недостатки. Предложена новая методика по определению показателей свойств оттаивающих грунтов – в испытаниях на трехосное сжатие. Получены характеристики деформационных и прочностных свойств, сопоставимые с результатами испытаний по нормируемым методикам.

В ходе проведения испытаний грунтов подтверждено, что для поведения оттаива-

ющих грунтов характерны общие закономерности поведения талых и немерзлых грунтов. Однако выявлено и влияние их специфических особенностей. В результате получены более высокие показатели деформируемости и низкие показатели прочности грунтов. При этом установлено, что поведение грунтов при оттаивании определяется первоначальным составом, строением, состоянием и свойствами мерзлых грунтов.

Список литературы

1. Роман Л.Т., Котов П.И., Царапов М.Н. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 5. С. 35–40.
2. Царапов М.Н., Котов П.И. Свойства мерзлых грунтов при оттаивании // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 9. С. 31–34.
3. Кальбергенов Р.Г., Котов П.И., Царапов М.Н. Определение деформационных характеристик оттаивающих грунтов методом трехосного сжатия // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 1. С. 28–32.
4. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
5. Гречищев С.Е. Физико-механические свойства оттаивающих ледогрунтов // Криосфера Земли: история и перспективы. 2004. Т. VIII, № 4. С. 47–52.
6. Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск – Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера земли: история и перспективы. 2016. Т. 20, № 2. С. 69–77.
7. Воронцова С.Д. Влияние климатических изменений на транспортную инфраструктуру в Арктической зоне и на территориях распространения вечной мерзлоты // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2017. № 4 (71). С. 33–39.
8. Ашпиз Е.С., Вавринюк Т.С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты // Мир транспорта. 2016. № 3. С. 102–107.
9. Брушков А.В. Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженер-

ных сооружений // Инженерные изыскания. 2015. № 14. С. 4–17.

10. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 35 с.

11. ГОСТ 53582-2009. Грунты. Метод определения сопротивления сдвигу оттаивающих грунтов. М.: Стандартинформ, 2010. 16 с.

12. Мельников Р.В. Компрессионные испытания грунта как способ определения параметров модели Hardening Soil // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. 2014. № 4. С. 90–94.

13. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Роман Л.Т., Царапов М.Н. и др. М.: Университетская книга, 2018. 188 с.

14. Котов П.И. и др. Влияние условий оттаивания и вида испытаний на деформационные характеристики оттаивающих грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 5. С. 8–13.

15. Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В. Лабораторные испытания грунтов в Московском государственном строительном университете (МГСУ-МИСИ) // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 60–65.