

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПРИ ОТТАИВАНИИ

А.И. Потапов, А.И. Шихов, Е.Н. Дунаева (Санкт-Петербургского Горного университета)

Освоение новых месторождений полезных ископаемых в зоне распространения вечномерзлых грунтов требует создания инфраструктуры и возведения зданий и сооружений в районах добычи полезных ископаемых. Очевидной проблемой в данной ситуации является мониторинг состояния вечномерзлых грунтов. Показана возможность применения для мониторинга вечномерзлых грунтов активного акустического метода контроля. Оценку состояния вечномерзлых грунтов предполагается вести по изменению динамических деформационных свойств грунтов при их оттаивании.

Ключевые слова: модуль упругости, криолитозона, акустические методы контроля, мониторинг вечномерзлых грунтов.

Введение

Большую часть севера РФ занимают моногорода, возведенные для обеспечения горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Строительство зданий и сооружений в таких городах в условиях распространения криолитозоны ведется согласно СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Согласно СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» к мерзлым грунтам могут применяться два принципа строительства: с сохранением мерзлого состояния грунтов как в период строительства, так и в период эксплуатации, и с возможностью оттаивания грунтов.

В настоящее время серьезной проблемой для таких городов становится повышение среднегодовой температуры воздуха и, как следствие, деградации вечномерзлых грунтов. Основными последствиями являются неравномерные мульды оседания фундаментов, подтопление и заболачивание. Страдают не только основания зданий и сооружений, но и проложенные к ним коммуникации. Нередко возникают прорывы трубопроводов, последствием которых является образование промывов в массиве вечномерзлых грунтов [1].

При проектировании фундаментов опираются на показатели деформационных свойств грунтов. К таким показателям относятся модуль общей деформации, коэффициент поперечного расширения или коэффициент Пуассона, модуль сдвига и коэффициент бокового давления, коэффициент пористости. Естественно, что в результате оттаивания грунтов эти показатели принимают значения, отличные от расчетных, принятых на этапе проектирования сооружения. Мониторинг и прогнозирование изменений деформационных свойств грунтов становится важной и актуальной проблемой в условиях деградации криолитозоны.

В районах распространения криолитозоны, обязательным является проведение геотехнического мониторинга зданий и сооружений. В ходе проведения геотехнического мониторинга обязательными являются контроль температурного режима грунтов, измерение осадок фундамента и основания. Несмотря на то, что геотехнический мониторинг проводится на всем протяжении эксплуатации сооружения, и разработано значительное число автоматизированных систем мониторинга [2–5], в настоящее время проблему окончательно решить не удалось.

Актуальным направлением решения данной проблемы является применение сейсмоакустических методов. Сейсмоакустические методы контроля в зависимости от частоты волны делятся на сейсмические и геоакустические. Геоакустические методы можно разделить на активные и пассивные. Активные методы базируются на возбуждении внешним источником упругой волны в массиве грунта и регистрации времени прохождения волны сквозь массив грунтов. При использовании пассивного метода акустического контроля регистрируются импульсы, возбуждаемые самим массивом грунтов, вследствие произошедших изменений в массиве (увеличение напряжений, образование новых трещин). Примером пассивного метода акустического контроля является акустико-эмиссионный метод. Возможности сейсмоакустических методов подробно описаны в работах [6–8].

В отличие от температурного и геодезического мониторинга при применении сейсмоакустических методов возможно непосредственно контролировать изменение деформационных свойств мерзлых грунтов. Несмотря на достаточную простоту проведения испытаний данными методами и быстроту получения результатов, явной проблемой для их применения является то, что при проектировании фундаментов сооружений используются статические значения деформационных свойств грунтов, а при определении деформационных свойств по средствам сейсмоакустических методов получают динамические значения деформационных свойств грунтов. Значения статического и динамического модулей упругости могут отличаться друг от друга в 2...4 раза, а в отдельных случаях соотношение модулей упругости может разниться в 11 раз.

Все инженерно-геологические способы определения статических значений деформационных свойств грунтов можно разделить на два типа — лабораторные и полевые. Значения статического модуля деформации грунтов, определенные лабораторными способами, получаются заниженными по сравнению со значениями, полученными в результате полевых исследований. Поэтому при проектировании оснований зданий и сооружений используют поправочные коэффициенты [9].

По мнению авторов, использование универсальных для группы грунтов корреляционных зависимостей между статическими значениями деформационных свойств грунтов и динамическими при

проведении геотехнического мониторинга невозможно. Значение деформационных свойств грунтов зависит от различных факторов, таких как нагрузка, засоленность, литологический состав, криогенная текстура, льдистость и т.д. Поэтому в лабораторных условиях не может быть установлена универсальная корреляционная зависимость, которая будет справедлива для любой строительной площадки с данным типом грунтов.

Поэтому мониторинг мерзлых грунтов должен начинаться на этапе инженерно-геологических изысканий, при проведении которых в полевых условиях необходимо устанавливать уникальную корреляционную зависимость между динамическими и статическими значениями деформационных свойств грунтов, непосредственно для грунтов данной строительной площадки. Это позволит проводить мониторинг деформационных свойств грунтов в период эксплуатации сооружений. Совместное применение полевых инженерно-геологических способов определения деформационных показателей грунтов (статических значений) и сейсмоакустических способов (динамических значений) позволит контролировать изменение деформационных свойств грунтов в период эксплуатации сооружения непосредственно в зоне влияния сооружения на грунты основания с учетом напряженно-деформируемого состояния грунтов. Применение же активных методов акустического контроля (в отличие от пассивных методов) позволит определить не только изменение механических свойств грунтов, но и область оттаивания грунтов или образование промыва в результате прорыва коммуникаций.

В работе проведены измерения динамического модуля деформации грунтов при оттаивании в лабораторных условиях с целью установления возможности определения посредством активного акустического метода перехода мерзлых грунтов из твердомерзлого состояния в пластичномерзлое. Данную работу можно рассматривать как начальный этап создания автономной системы непрерывного мониторинга и прогнозирования разрушения оснований сооружений, цель которой заключается в совместном применении полевых инженерно-геологических способов определения деформационных свойств мерзлых грунтов и активного акустического способа. Система позволит контролировать изменение непосредственно деформационных свойств мерзлых грунтов в отличие от применяемых в настоящее время геодезических и температурных способов геотехнического мониторинга.

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования посвящены определению динамического модуля упругости вечномерзлых грунтов при их оттаивании. Исследования проводились на образцах песка и суглинка. На первом этапе образцы подвергались сушке с целью дальнейшего увлажнения. Влажность образцов составляла 10%, 20%, 30%. Образцы замораживались в деревян-

ной опалубке, перед заморозкой в центр образца устанавливался терморезистор. Терморезистор выполнял роль температурного датчика. Температура образцов определялась по изменению сопротивления терморезистора. Сопротивление терморезистора определялось с помощью мультиметра. На следующем этапе образцы на сутки закладывались в морозильную камеру, температура в которой составляла $-18,5^{\circ}\text{C}$. После выдержки образца в морозильной камере проводились измерения скорости распространения ультразвуковой волны. Замеры происходили по мере оттаивания образцов и достижения ими температуры -15°C , -10°C , -5°C и 0°C . Оттаивание образцов происходило при комнатной температуре, равномерно, в направлении от края к центру образца. При достижении образцом нужной температуры измерялась длина образца, после чего выполнялись измерения времени распространения ультразвуковой волны. Прибором для измерения времени распространения продольной ультразвуковой волны послужил Пульсар 1М. Для обеспечения акустического контакта между образцом, приемным и излучающим преобразователем применялась жидкая смазка. Время распространения ультразвуковой волны измерялось путем сквозного прозвучивания образца. Цикл состоял из 20 замеров. Время распространения волны определялось как среднее арифметическое значение, полученных в ходе одного цикла, результатов:

$$T_{o_i} = (T_1 + T_2 + T_3 \dots + T_n) / n; \quad T_{o_t} = (T_1 + T_2 + T_3 \dots + T_n) / n;$$

где T_{o_i} — время прохождения ультразвуковой волны через образец, при данной температуре; T_n — значение времени распространения волны для каждого измерения; n — число измерений в цикле, в данном случае $n=20$.

Значение скорости распространения продольной ультразвуковой волны рассчитывалось по формуле:

$$V = \frac{l}{T_{o_i}},$$

где l — длина образца.

По полученным значениям скорости распространения продольной ультразвуковой волны, были рассчитаны значения динамического модуля упругости по формуле:

$$E_d = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu},$$

где E_d — динамический модуль деформации грунтов; V_p^2 — скорость распространения продольной ультразвуковой волны; ρ — плотность грунтов; μ — коэффициент Пуассона.

Так как экспериментальные данные о значении коэффициента Пуассона отсутствовали, значение коэффициента Пуассона принято в соответствии с СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

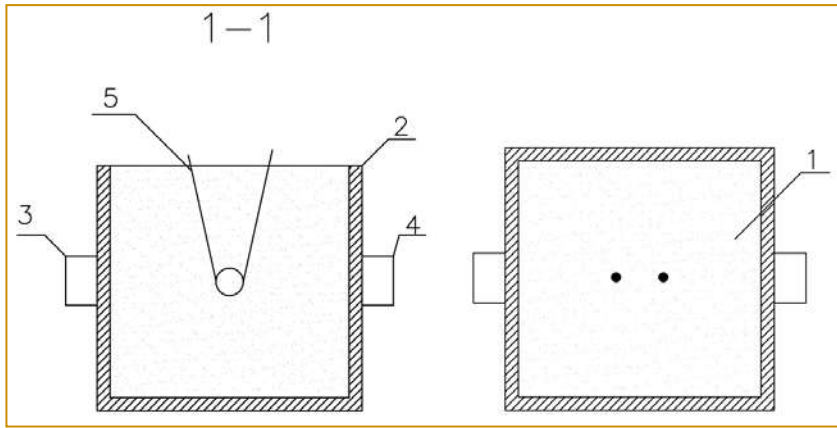


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – образец мерзлого грунта, 2 – деревянная опалубка, 3 – излучающий преобразователь, 4 – приемный преобразователь, 5 – терморезистор

номерзлого, так и твердомерзлого состояния. В данном диапазоне происходит резкое снижение значения динамического модуля упругости грунтов. Разница между значениями в верхней части и нижней части диапазона наиболее ощутима (в сравнении с первым и третьим диапазоном).

Третий диапазон соответствует температуре грунта от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Здесь происходит полный переход грунта из твердомерзлого состояния в пластичномерзлое состояние. Разница между значениями динамического модуля упругости в верхней и нижней частях диапазона практически отсутствует.

Обсуждение результатов экспериментов

В таблице показаны результаты определения динамического модуля упругости по скорости распространения продольной ультразвуковой волны.

Характерная зависимость динамического модуля упругости от температуры грунта при его оттаивании представлена на рис. 2.

На графиках изменения динамического модуля упругости при оттаивании грунтов, представленных на рис. 2, можно выделить три диапазона, причем разделение возможно выполнить не зависимо от типа и влажности грунта.

В первом диапазоне при температуре грунта от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ сохранялось твердомерзлое состояние грунта во всем объеме образца, поэтому значение динамического модуля упругости грунта изменялось не значительно.

Второй диапазон соответствует температуре грунта от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так как оттаивание образца происходило в направлении от края к центру, и температурный датчик находился в центре образца (при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в центре образца, значительная часть образца оттаивала), в этом диапазоне температур образцы грунта имели участки как пластич-

Вывод

В ходе работы экспериментально установлено, что для каждого образца грунта при оттаивании возможно выделить начало перехода из твердомерзлого состояния в пластичномерзлое состояние с помощью акустического метода контроля. Начало перехода можно обнаружить по резкому снижению значения динамического модуля упругости грунта, причем резкое падение значения динамического модуля упругости происходит на всем диапазоне перехода грунта из твердомерзлого состояния в пластичномерзлое состояние (второй диапазон). Этот результат открывает возможность обоснования методики мониторинга состояния вечномерзлых грунтов с помощью акустических методов контроля. Отметим, что при определении динамического модуля упругости по параметрам распространения упругих волн принималось значительное допущение, что среда является идеально упругой и изотропной. Однако известно, что многие виды грунтов отличаются по механическим свойствам от идеально упругого тела: обладают вязкоупругими свойствами. Процесс распространения упругих волн в таких средах характеризуется их затуханием и зависимостью коэффициента затухания

Таблица. Результаты определения динамического модуля упругости по скорости распространения продольной ультразвуковой волны в различных средах

Песок, влажность 10%				Песок, влажность 20%			
$t, ^{\circ}\text{C}$	$V_p, \text{ м/с}$	μ	$E_D, \text{ ГПа}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$V_p, \text{ м/с}$	μ	$E_D, \text{ ГПа}$
-15	2003	0.3	4.7	-15	2314	0.3	6.89
-10	1945	0.3	4.48	-10	2196	0.3	6.2
-5	1521	0.3	2.73	-5	1646	0.3	3.5
0	1408	0.3	2.4	0	1584	0.3	3.2
Суглинок, влажность 20%				Суглинок, влажность 30%			
$t, ^{\circ}\text{C}$	$V_p, \text{ м/с}$	μ	$E_D, \text{ ГПа}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$V_p, \text{ м/с}$	μ	$E_D, \text{ ГПа}$
-15	2081	0.35	5.19	-15	2132	0.35	5.9
-10	1991	0.35	4.75	-10	2015	0.35	5.27
-5	1592	0.35	3.04	-5	1764	0.35	4.04
0	1523	0.35	2.8	0	1629	0.35	3.44

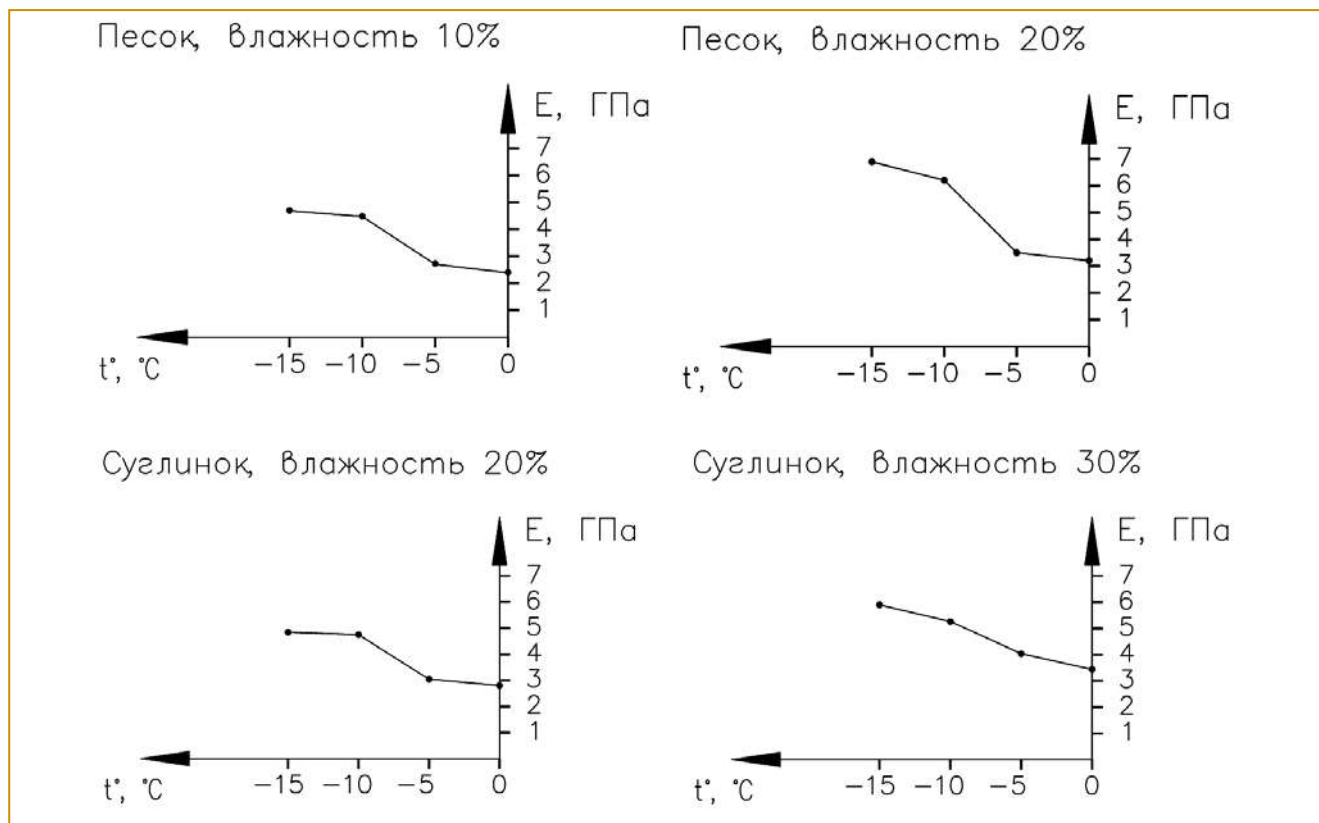


Рис. 2. Зависимость динамического модуля упругости от температуры вечномерзлого грунта, при оттаивании. По горизонтали – температура грунта; по вертикали – значение динамического модуля упругости

от частоты. Упругие характеристики вязкоупругих материалов, помимо всего, в значительной степени зависят от скорости приложения и величины нагрузок. Пренебрежение данным фактом может привести к неоднозначным результатам при определении упругих характеристик этих материалов, что подтверждается при экспериментальном определении статического модуля деформации грунтов. Поэтому для получения достоверных результатов при дальнейших исследованиях необходимо определять динамические и статические показатели деформационных свойств мерзлых грунтов при оттаивании с учетом напряженно-деформируемого состояния грунтов на глубине заложения фундаментов.

Список литературы

1. Скупов Б. Глобальное изменение климата и диградация вечной мерзлоты / Скупов Б. // Строительный эксперт. 2017. №4.
2. Богданов А.И. Автоматизированная система мониторинга состояния столбчатых оснований мостов (АСУ-СОУ), эксплуатируемых по принципу I на высотемпературных вечномерзлых грунтах / Богданов А.И., Едигарян А.Р. // Проблемы развития сети железных дорог. 2006. с. 140-145.
3. Амосова Е.В. Система мониторинга температуры протяженных объектов в вечномерзлых грунтах / Амосова Е.В., Кропачев Д.Ю., Паздерин Д.С. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. №2. 2011. с. 67-70.
4. Елизаров А.С. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем / Елизаров А.С., Курчатова А.Н. // Вестник СГУ-ГИТ. 2020. №1. С. 28-42.
5. Сергина О.В. Геодезический мониторинг осадков оснований и фундаментов зданий и сооружений нефтегазоконденсатных месторождений / Сергина О.В., Курячая Е.А. // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2018. №2. с. 75-82.
6. Бондарев В.И. Основы сейсморазведки. / Бондарев В.И./ Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 333 с.
7. Архангельский И.В. Пути повышения качества исследований деформационных свойств грунтов / Архангельский И.В. // Инженерная геология. 2008. №6. С. 57-63.
8. Потапов А.И. Акустоэмиссионный контроль мерзлых оснований сооружений и принципы построения автоматизированных диагностических систем / Потапов А.И., Павлов И.В. // Сб. "Незатрагивающие физические методы средства контроля" СПб., 1993. С. 31-33.
9. Аксенов В.И. Коэффициенты для корректировки значений модулей деформации, полученных в результате компрессионных испытаний мерзлых грунтов/Аксенов В. И.//Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 4. Вып. 1.

Потапов Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор,
Шихов Александр Игоревич – аспирант, **Дунаева Евгения Николаевна** - аспирант кафедры метрологии,
 приборостроения и управления качеством Санкт-Петербургского Горного университета.
 E-mail: shihov-gol@mail.ru apot@mail.ru Evgenia-dynaeva@mail.ru