

УДК 625.12

Лабораторные испытания оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна для определения статического и динамического модулей деформации

А. В. Святогорова, Д. В. Рубцов, Е. И. Вельгун, Д. Л. Соколов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Святогорова А. В., Рубцов Д. В., Вельгун Е. И., Соколов Д. Л. Лабораторные испытания оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна для определения статического и динамического модулей деформации // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 176–185. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-176-185

Аннотация

Цель: Изучение оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна посредством лабораторных испытаний, направленных на определение статического и динамического модулей деформации. Данные исследования необходимы для оценки прочностных характеристик и деформационных свойств грунта, что позволит повысить надежность проектирования и строительства сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, обеспечивая безопасность эксплуатации объектов инфраструктуры. **Метод:** Лабораторные испытания проводились с помощью прибора трехосного сжатия НПП «Геотек». **Результаты:** Основными результатами испытаний является получение модуля деформации в условиях статического и динамического нагружения предварительно замороженного образца. **Практическая значимость:** Полученные результаты обладают значительной практической значимостью, поскольку обеспечивают возможность разработки обоснованных технических решений при строительстве и эксплуатации сооружений в регионах с распространением многолетнемерзлых грунтов. Важность таких исследований обусловлена необходимостью учета специфики механического поведения оттаивающего грунта, что непосредственно влияет на прочность и стабильность конструкций.

Ключевые слова: Железные дороги, оттаивающий грунт, земляное полотно, статический модуль деформации, динамический модуль деформации, многолетнемерзлые грунты.

Введение

Многочисленные регионы России характеризуются наличием многолетнемерзлых грунтов, занимающих значительную площадь территории страны. Особенность таких грунтов состоит в наличии льда в структуре, что придает им уникальные свойства, отличающиеся от обычных почвенных образований. При повышении температуры, вызванном климатическими условиями или антропогенным влиянием, начинается процесс оттаивания, приводящий к существенным изменениям физических и механических характеристик грунта [1, 2].

Эти изменения оказывают решающее воздействие на условия эксплуатации сооружений различного назначения, расположенных в указанных регионах. Особенно актуально исследование процесса оттаивания многолетнемерзлых грунтов в связи с интенсивным развитием инфраструктуры и увеличением объемов строительства в Арктике и Субарктике.

Главная задача статьи — изучить закономерности изменений физико-механических свойств грунтов при переходе из мерзлого состояния в талое состояние. Для достижения цели использованы современные методы лабораторных испытаний, позволяющие точно измерять показатели деформаций и напряжения, возникающие в процессе оттаивания.

Важнейшим результатом проведенного эксперимента стало получение значений статического и динамического модулей деформации, необходимых для корректного моделирования нагружений и расчетов конструкций.

Описание лабораторной установки

Испытания проводятся с использованием динамического трехосного стабилометра производства компании «Геотек». Стабилометр выполняет динамическое и статическое трехосное испытание в соответствии со спецификациями Российской Федерации ГОСТ Р 56353—2015 и ГОСТ Р 59597—2021 [3, 4].

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Прибор трехосного сжатия (или триаксиальная установка) используется в геотехнических лабораториях для изучения механических свойств грунтов и горных пород под действием различных видов напряжений. Этот аппарат применяется главным образом для измерения прочности и деформации образцов грунта при всестороннем (трехосном) приложении сжимающего усилия.

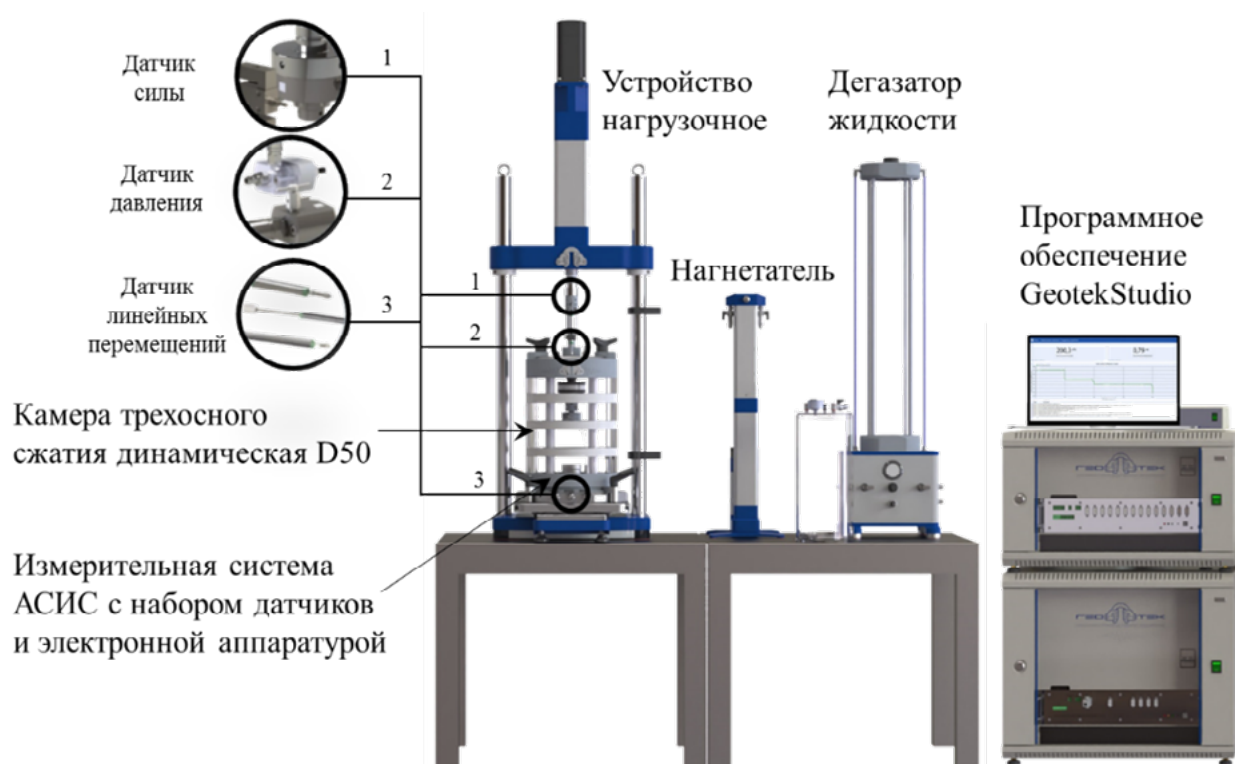


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Основные элементы прибора трехосного сжатия:

1. Камера высокого давления: герметичная камера, в которой размещается образец грунта. Камера наполняется жидкостью под давлением, создающим боковую нагрузку на образец.

2. Нагрузочное устройство: механизм подачи вертикальной осевой нагрузки на верхний торец образца, позволяющий создавать различные уровни нормального напряжения.

3. Система управления нагрузкой: включает устройства регулирования и поддержания заданных уровней боковых и осевых усилий.

4. Регистрирующая система: датчики и оборудование для регистрации величин деформации, приложенного давления и иных параметров.

Подготовка образца грунта для испытаний

Перед началом испытаний с помощью разъемного кольца из грунта нарушенной структуры изготавливается образец грунта размером 50 мм на 100 мм цилиндрической формы.

Затем, для создания условий оттаивания, грунт помещается в морозильную камеру минимум на 12 часов.

В этом исследовании для расчета деформаций использовался плотный супесчаный грунт плотностью $\rho = 1,91 \text{ г/см}^3$. Характеристики грунта приведены в таблице.

Параметры грунта для испытаний

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Влажность, $w, \%$	Главное напряжение, $\sigma_3, \text{кПа}$	Главное напряжение, $\sigma_1, \text{кПа}$	Частота нагружения $f, \text{Гц}$
-1	9,2	10	10	1,0
-1	10	15	50	2,0
-0,5	12	20	100	3,0
-0,5	14,3	30	200	4,0

Фото изготовленных образцов представлено на рис. 2.

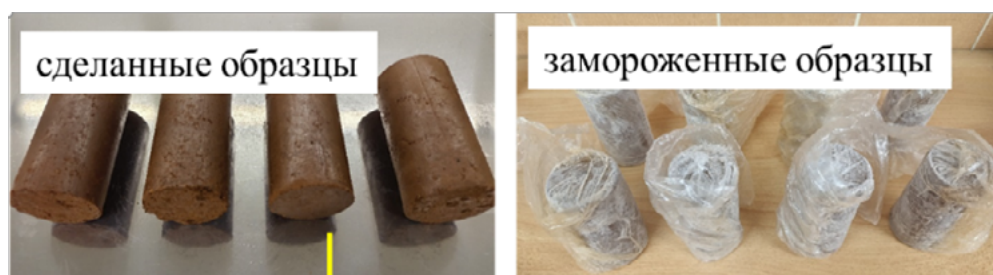


Рис. 2. Изготовленные образцы для лабораторных испытаний
(фото: А. В. Святогорова)



Рис. 3. Изготовленный лед для лабораторных испытаний (фото: А. В. Святогорова)

Во время проведения испытаний очень важно поддерживать конкретную температуру грунта, обозначенную в схеме испытаний.

Для этого также за некоторое время до испытаний изготавливаются образцы из дистиллированной воды, которые затем также будут установлены в камеру (рис. 3).

Этапы проведения испытаний

Все испытания проводятся в соответствии с ГОСТ Р 59597—2021 [4], ГОСТ 12248—2010 [5], ГОСТ Р 56353—2015 [3]. В соответствии с методическими рекомендациями к испытаниям в камере трехосного сжатия НПП «Геотек» [6] последовательность действий при проведении испытаний следующая:

1. Изготавливаются образцы грунта и лед.
2. Проводится подготовка лабораторного оборудования перед началом испытания (проверка наличия всех необходимых инструментов, наличия датчиков).
3. Непосредственно перед установкой испытуемого образца заливается вода в дегазатор.
4. Устанавливается образец грунта в специальную мембрану и на плунжер с обложением фильтрованной бумагой (рис. 4).
5. Укладываются образцы льда в камеру.
6. Происходит закрытие трехосной камеры, установка и закрепление колбы (рис. 5).
7. Вода из дегазатора подается с помощью нагнетателя в камеру.
8. Устанавливаются датчики перемещений.
9. Вводятся в приложении GeotekStudio необходимые параметры испытания, тип испытаний и требуемые ограничения. После ввода нужных параметров необходимо нажать кнопку «Начать испытание».
10. Испытание завершается по достижении установленного количества циклов нагрузки. После испытания нагрузочное устройство автоматически

разгружается, давление в трехосной камере сбрасывается, и рабочая жидкость сливается.

11. По окончании испытаний данные экспортируются автоматически в измерительную систему АСИС «Обозреватель протоколов» (рис. 6).

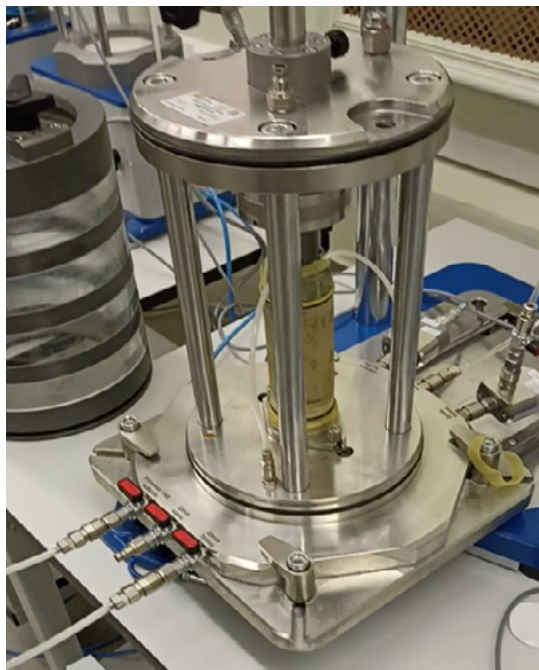


Рис. 4. Установленный образец в камеру трехосного сжатия (фото: А. В. Святогорова)

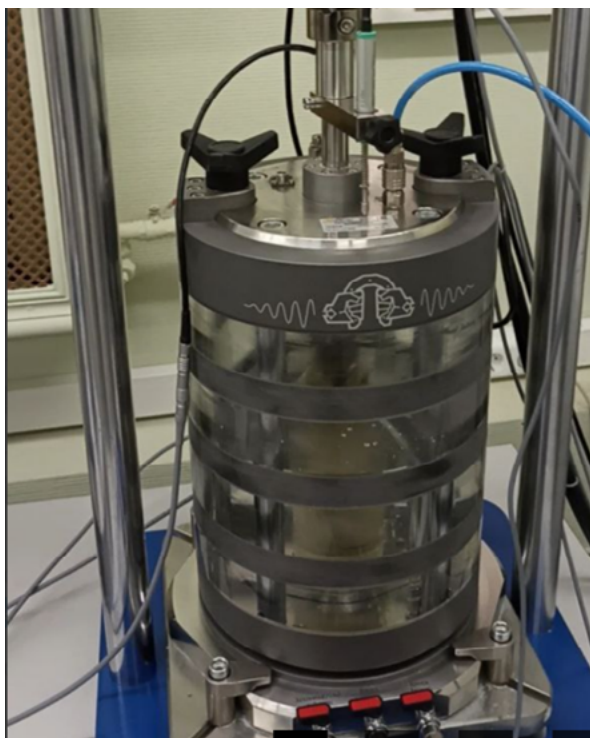


Рис. 5. Установленный образец (фото: А. В. Святогорова)

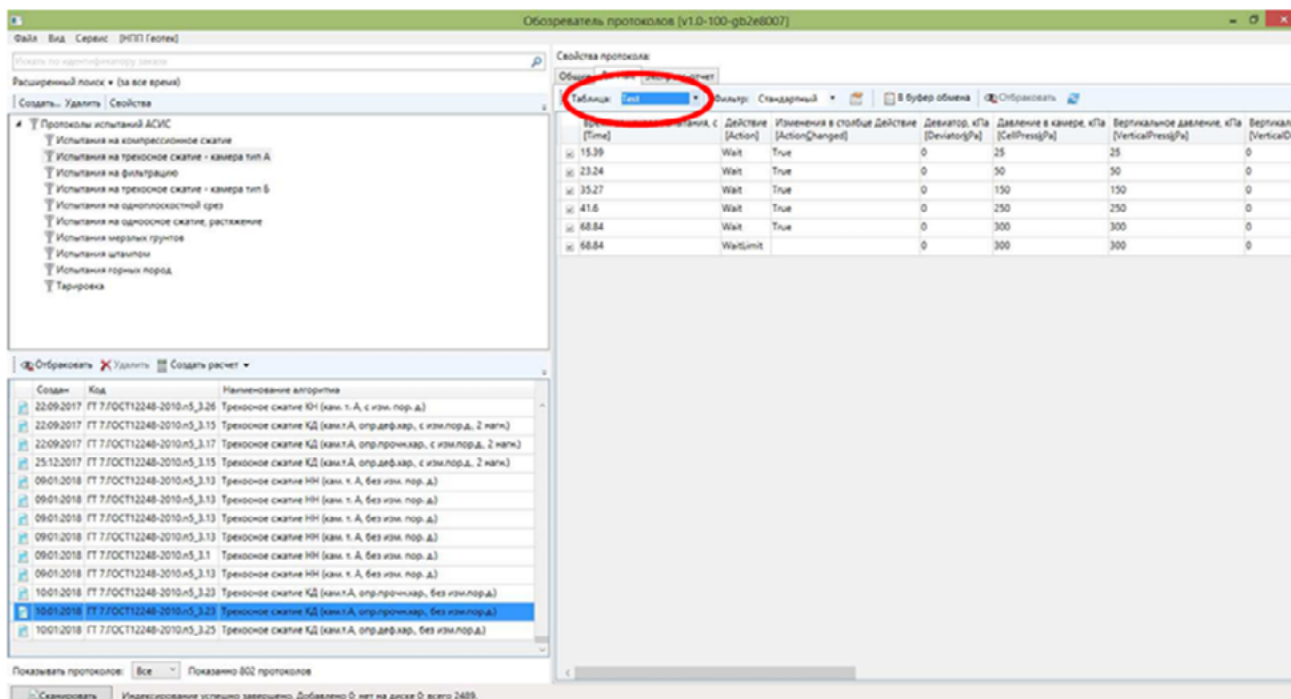


Рис. 6. Рабочее окно системы АСИС «Обозреватель протоколов»

В зависимости от задаваемых параметров одно испытание проходит около часа. Во время статических испытаний нагрузочное устройство все время воздействует на образец, при этом постепенно увеличивая нагрузку. В случае с динамикой нагрузочное устройство последовательно задает определенную нагрузку, резко сбрасывает ее, затем устанавливает еще большую нагрузку, и так продолжается до момента разрушения образца.

После проведения испытания приступают к их обработке.

Обработка результатов испытаний

Для обработки результатов после завершения испытания была использована программа «Обозреватель протоколов» НПП «Геотек».

Результаты испытаний в Обозревателе протоколов отображаются в табличной форме, данные можно скопировать и переносить в удобные пользователю сервисы для обработки информации.

На основе результатов испытаний были построены графики зависимости осевого напряжения (кПа) от осевой деформации, примеры результатов динамических и статических испытаний представлены на рис. 7 и 8.

На основании полученных графиков по формулам (1) и (2) можно определить значения статического и динамического модулей деформации [7]:

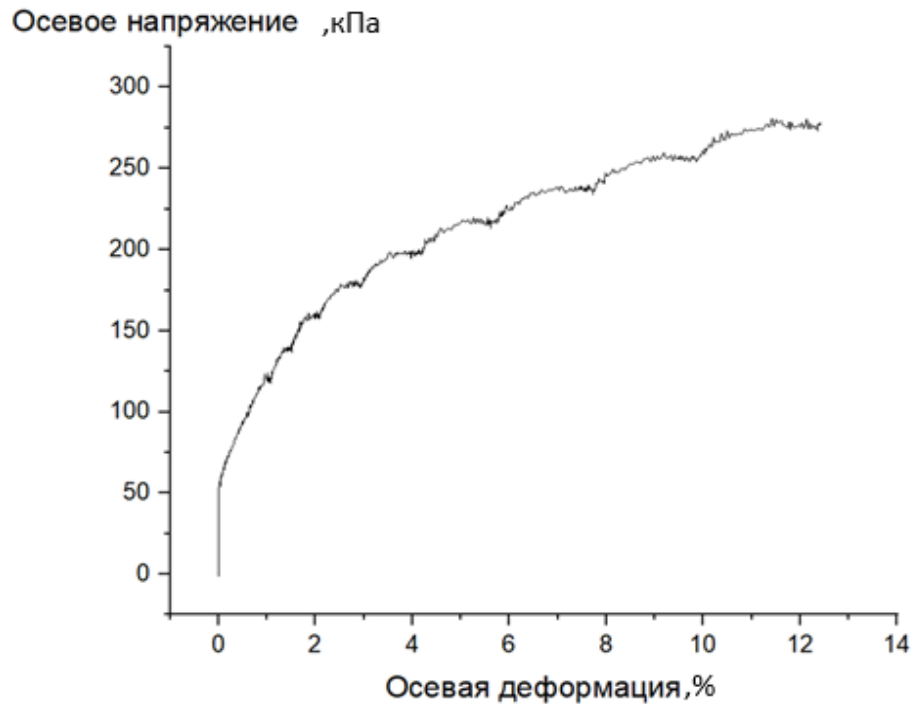


Рис. 7. Определение динамического модуля деформации

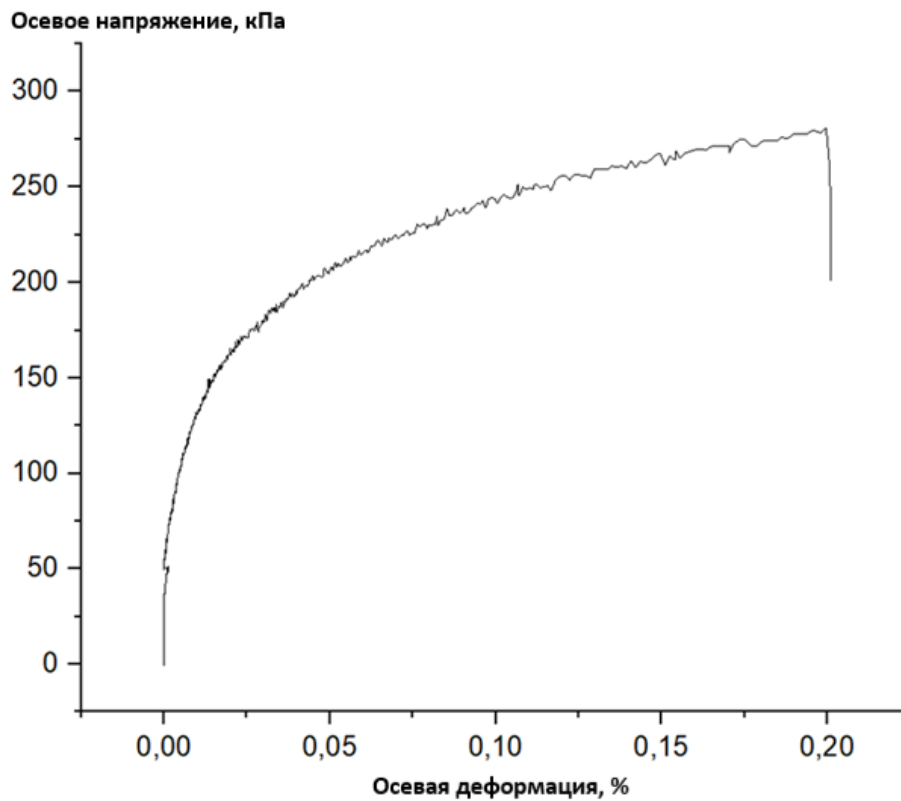


Рис. 8. Определение статического модуля деформации

$$E_{\text{ст}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}; \quad (1)$$

$$E_{\text{дин}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ст}}$ — статический модуль деформации, кПа;
 $E_{\text{дин}}$ — динамический модуль деформации, кПа;
 σ — главное напряжение, кПа;
 ε — значение осевой деформации, %.

По результатам расчета было выявлено, что значение динамического модуля деформации значительно выше, чем статического.

Заключение

Статические и динамические испытания, проведенные в рамках данной статьи, показали высокую эффективность лабораторных испытаний оттаивающих многолетнемерзлых грунтов в камере трехосного сжатия. Определены ключевые характеристики грунта, такие как статические и динамические модули деформации, необходимые для проектирования и анализа поведения земляного полотна в суровых природных условиях.

Выявленные различия между значениями статического и динамического модулей подтверждают необходимость отдельного учета напряженно-деформационного состояния при проектировании сооружений в районах вечномерзлых пород. Динамический модуль оказался существенно выше статического, что позволяет точнее оценивать поведение конструкций при воздействии вибрационных и ударных нагрузок.

Список источников

1. Юрченко В. А. Вечная мерзлота: геокриологические опасности и региональная деградация мерзлых грунтов / В. А. Юрченко, А. В. Манько // ИВД. — 2023. — № 8(104). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnaya-merzlota-geokriologicheskie-opasnosti-i-regionalnaya-degradatsiya-merzlyh-gruntov>.
2. Бушуев Н. С. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников, В. А. Герасимов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 135–142.
3. ГОСТ Р 56353—2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
4. ГОСТ Р 59597—2021. Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов.

5. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

6. Методические рекомендации по проведению испытаний в камере трехосного сжатия динамической ГТ 2.3.20 и колонке резонансной малой ГТ 2.3.22 НПП «Геотек».

7. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / И. В. Прокудин. — Ленинград, 1982. — 458 с.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 28.07.2025

Контактная информация:

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — инженер; svyatogorova@pgups.ru

РУБЦОВ Дмитрий Владимирович — студент; rubtsov47@gmail.com

ВЕЛЬГУН Елизавета Игоревна — студент; velgun51@gmail.com

СОКОЛОВ Демид Леонидович — студент; demid.sokolov99@mail.ru

Laboratory Testing of Thawing Permafrost Subgrade Soils to Determine Static and Dynamic Deformation Modulus

A. V. Svyatogorova, D. V. Rubtsov, E. I. Velgun, D. L. Sokolov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Svyatogorova A. V., Rubtsov D. V., Velgun E. I., Sokolov D. L. Laboratory Testing of Thawing Permafrost Subgrade Soils to Determine Static and Dynamic Deformation Modulus. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 176–185. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-176-185

Summary

Purpose: To analyse the thawing of permafrost subgrade soils through laboratory tests aimed at determining the static and dynamic deformation modules. These studies are essential for evaluating the strength characteristics and deformation properties of the soil, thereby enhancing the reliability of design and construction of structures in permafrost conditions, thus ensuring the safety of infrastructure facilities. **Method:** Laboratory tests were carried out using a three-axis compression device developed by “Geotek” Scientific Industrial Enterprise. **Results:** The primary outcomes of the investigation are the acquisition of the deformation modulus of a pre-frozen sample under both static and dynamic loading conditions. **Practical significance:** The results obtained are of crucial practical significance, as they provide the opportunity to develop effective technical solutions for the construction and operation of structures in permafrost regions. The significance of these studies lies in their ability to account for the unique mechanical behaviour of thawing soils, which directly affects the strength and stability of structures.

Keywords: Railways, thawing soils, subgrade, static modulus of deformation, dynamic modulus of deformation, permafrost soils.

References

1. Yurchenko V. A., Manko A. V. *Vechnaya merzlota: geokriologicheskie opasnosti i regional'naya degradatsiya merzlykh gruntov* [Permafrost: geocryological hazards and regional degradation of frozen soils]. IVD, 2023, Iss. 8(104). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnaya-merzlota-geokriologicheskie-opasnosti-i-regionalnaya-degradatsiya-merzlykh-gruntov>. (In Russian)
2. Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A. et al. Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoi dorogi v usloviyakh vечноi merzloty [Features of railway route design in permafrost conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 135–142. (In Russian)
3. *GOST R 56353—2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST R 56353—2015. Soils. Methods for laboratory determination of dynamic properties of dispersed soils]. (In Russian)
4. *GOST R 59597—2021. Grunty. Metod trekhosnogo szhatiya merzlykh gruntov* [GOST R 59597—2021. Soils. Triaxial compression method for frozen soils]. (In Russian)
5. *GOST 12248—2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics]. (In Russian)
6. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu ispytaniy v kamere trekhosnogo szhatiya dinamicheskoi GT 2.3.20 i kolonke rezonansnoi maloi GT 2.3.22 NPP “Geotek”* [Methodical recommendations for testing in a dynamic triaxial compression chamber GT 2.3.20 and small resonance column GT 2.3.22 of NPP “Geotek”]. (In Russian)
7. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.06* [Strength and deformability of railway roadbed made of clay soils subject to vibrodynamic load: dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.22.06]. Leningrad, 1982, 458 p. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: July 28, 2025

Author's information:

Anastasia V. SVYATOGOROVA — Engineer; svyatogorova@pgups.ru

Dmitry V. RUBTSOV — Student; rubtsov47@gmail.com

Elizaveta I. VELGUN — Student; velgun51@gmail.com

Demid L. SOKOLOV — Student; demid.sokolov99@mail.ru