

УДК 625.12

Расчет осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки

А. В. Святогорова¹, И. В. Колос¹, Д. Р. Кузнецова¹, Т. Ю. Вальцева²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

Для цитирования: Святогорова А. В., Колос И. В., Кузнецова Д. Р., Вальцева Т. Ю. Расчет осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 124–134. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-124-134

Аннотация

Цель: Разработка методики расчета осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна железнодорожных путей под действием динамических нагрузок. Проведение сравнительного анализа результатов расчета осадок при воздействии динамической нагрузки с результатами традиционных расчетов, основанных на статическом подходе. **Метод:** Исходные параметры для выполнения расчетов осадки были определены экспериментальным путем посредством лабораторных исследований грунтов в установке трехосного сжатия. Для моделирования процесса осадки использовался численный метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в специализированном программном комплексе COMSOL Multiphysics. Данный комплекс позволил учесть особенности взаимодействия сложных геологических условий с динамическими нагрузками, возникающими при движении железнодорожного транспорта. **Результаты:** Выполненный расчет показал, что величина осадки земляного полотна при учете динамического воздействия значительно превосходит осадку, полученную при использовании традиционного статического метода расчета. Это подтверждает важность корректного учета динамических характеристик при оценке устойчивости дорожных насыпей, построенных на многолетнемерзлых грунтах. **Практическая значимость:** Учет динамических нагрузок является критически важным фактором для обеспечения высокой надежности и долговечности строительных конструкций на участках с оттаивающим мерзлым грунтом. Применение предложенной методики позволяет точно предсказывать возможные деформации и осадки грунтовых оснований, что, в свою очередь, помогает избежать преждевременных разрушений и аварийных ситуаций. Таким образом, данная работа имеет высокую практическую ценность для повышения уровня безопасности и эффективности строительства и эксплуатации железнодорожных магистралей в зонах распространения многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: Осадка, железнодорожный транспорт, оттаивающие грунты, земляное полотно, динамические нагрузки, многолетнемерзлые грунты.

Введение

В условиях глобального потепления таяние вечной мерзлоты становится все более актуальной проблемой. Оттаивание верхнего слоя приводит к тому, что грунт теряет свою несущую способность и деформационные свойства, что вызывает разрушение железнодорожных конструкций. Даже небольшие изменения температуры могут привести к значительным деформациям [1].

Одним из важных параметров в расчетах показателей деформируемости грунтов земляного полотна является динамический модуль деформации (E_d), который описывает свойства материала в условиях динамического нагружения. Учет динамического модуля деформации существенно влияет на расчет осадки земляного полотна, особенно когда речь идет о дорожных конструкциях, испытывающих постоянные нагрузки, таких как железные и автомобильные дороги. Данный модуль учитывает поведение грунта при циклических нагрузках, таких как воздействие движущегося транспорта. В отличие от статической нагрузки, где учитываются лишь мгновенные реакции грунта, динамическая нагрузка вызывает накопление деформаций, связанных с повторяемостью воздействий.

Динамический модуль деформации является более полным и точным показателем для оценки поведения грунта при различных видах нагрузок, включая динамические воздействия. Это делает его важным параметром при проектировании и строительстве инженерных сооружений [2].

Учет динамики при расчете осадки земляного полотна позволяет более точно оценить устойчивость конструкций к внешним воздействиям, особенно в зонах с высокой сейсмической активностью или вблизи источников вибраций.

Актуальность темы исследования также подчеркивается в программе развития ОАО «РЖД», согласно которой в последние годы отмечается увеличение масштабов строительства железных дорог в Арктике, несмотря на негативные последствия глобального потепления для многолетнемерзлых грунтов. Это требует обеспечения устойчивости земляного полотна и его основания к деформациям в условиях оттаивания грунтов в регионах с распространением многолетней мерзлоты [3].

Лабораторные испытания

Определение статического и динамического модуля деформации проводится в лаборатории с помощью прибора трехосного сжатия [4]. Данный прибор позволяет проводить испытания в статическом и динамическом режиме. Схема прибора представлена на рис. 1.

Этапы проведения лабораторных испытаний следующие [5, 6]:

1. Подготовка образца грунта к испытанию:

- Изготавливается образец грунта нарушенной структуры размером 50×100 мм с помощью разъемного кольца.
- Образец отправляется в морозильную камеру не менее чем на 12 часов для создания условий оттаивающего многолетнемерзлого грунта.
- Непосредственно перед испытанием измеряется температура грунта и заносится в ведомость результатов испытания.

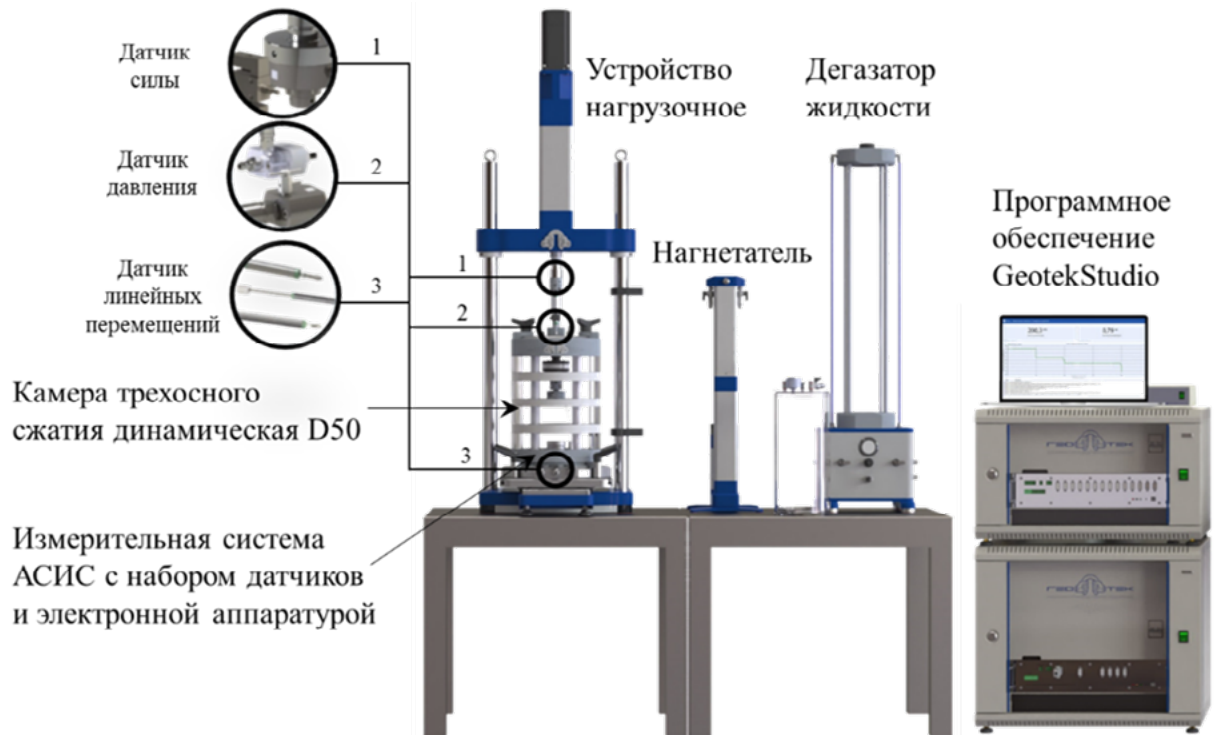


Рис. 1. Прибор трехосного сжатия

2. Подготовка лабораторного оборудования:

- Проверка оборудования на работоспособность.
- Подключение программного обеспечения.
- Заливка дистиллированной воды в дегазатор в объеме около 5 литров.

3. Установка образца в камеру:

- На нижний штамп камеры устанавливается пористый диск.
- На диск укладывается фильтрованная бумага.
- Образец грунта с помощью разъемного кольца помещается в оболочку

и устанавливается на штамп.

- На верхний торец образца укладывается фильтрованная бумага.

– Перед подачей воды необходимо закрыть камеру стойкой, закрутить винты и установить датчики перемещений.

4. Подача воды в камеру из дегазатора.

5. Работа с ПО Geotek Studio:

– С помощью программного обеспечения Geotek Studio задаются параметры для проведения испытаний.

Во время статических испытаний нагрузочное устройство постоянно воздействует на образец, постепенно увеличивая силу воздействия. В случае же динамических испытаний нагрузочное устройство задает определенную нагрузку, резко ее сбрасывает, затем задает еще большую нагрузку, и так продолжается до момента разрушения образца. Разрушение образца происходит при достижении деформации, составляющей 20 % от его первоначальной высоты.

В данном исследовании для расчета деформаций использовалась твердая супесь плотностью $\rho = 1,91 \text{ г/см}^3$. Характеристики испытания представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры, необходимые для расчета

№ исп.	Температура, T	Влажность, ω , %	Главное напряжение, σ_3	Главное напряжение, σ_1	Частота нагружения f , Гц
1	-1	9,2	10	10	1,0
2	-1	10	15	50	2,0
3	-0,5	12	20	100	3,0
4	-0,5	14,3	30	200	4,0

Обработка результатов

На основании результатов испытаний были получены графики зависимости осевого напряжения (кПа) от осевой деформации. Один из результатов испытания представлен на рис. 2.

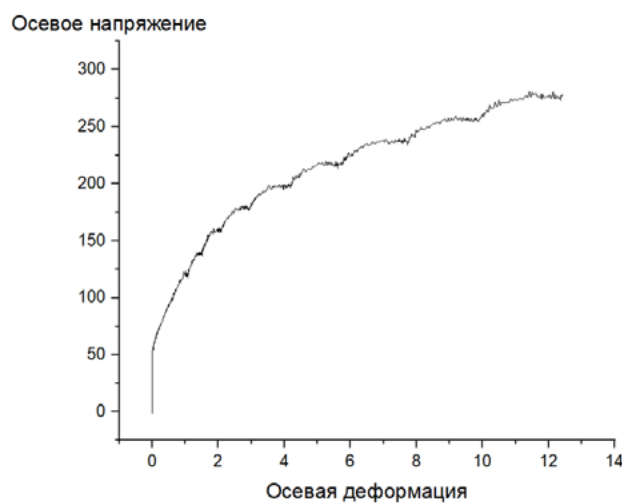


Рис. 2. К определению модуля деформации

В соответствии с ГОСТ 56353—2015 [7] и ГОСТ 12248—2010 были определены значения статического и динамического модулей деформации по формулам (1) и (2):

Модуль деформации в условиях динамического нагружения:

$$E_d = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\max}}, \quad (1)$$

где σ — осевое напряжение, кПа;
 ε — осевая деформация, %.

Модуль деформации в условиях статического нагружения:

$$E_d = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (2)$$

где σ — осевое напряжение, кПа;
 ε — осевая деформация, %

По результатам статических и динамических испытаний были получены следующие усредненные значения деформаций:

$$E_s \sim 228 \text{ кгс/см}^2 = 22,8 \text{ Мпа};$$

$$E_d \sim 30,4 \text{ Мпа}.$$

Согласно данным лабораторных испытаний, значение динамического модуля деформации на 35 % выше показателя статического модуля.

Расчет параметров с помощью МКЭ

В рамках расчета принята конструкция железнодорожной насыпи высотой 3,5 м с поперечным уклоном 1:1,5, схема представлена на рис. 3. Начальные параметры грунтов представлены в табл. 2.

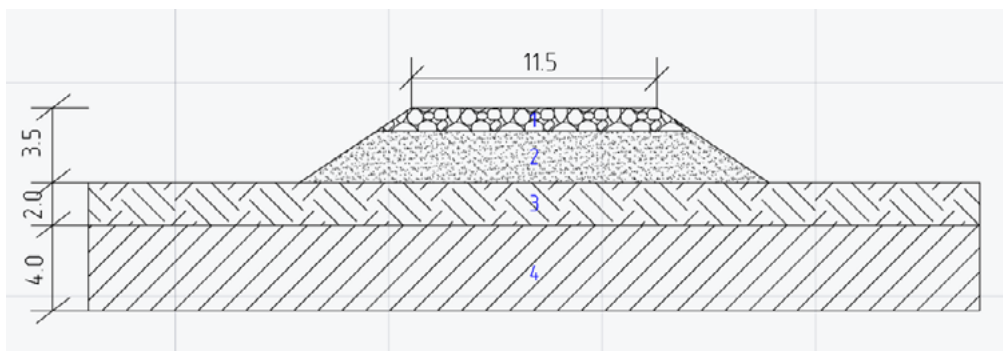


Рис. 3. Схема насыпи для расчета

ТАБЛИЦА 2. Начальные параметры материалов земляного полотна

Слой	ρ / (кг/м ³)	ω_0 / (%)	T_n / (°C)
1 — гравий	1950	6	-3,2
2 — крупный песок	1900	6	-2,8
3 — песчанистая твердая супесь (сезонно-талый слой)	1800	12	-2,1
4 — пылеватая глина	1600	30	-3,1

На основании лабораторных данных с помощью в программном комплексе COMSOL Multiphysics [8] были получены амплитуды динамического перемещения. Верификация результатов амплитуды динамических перемещений проведена на основе показателя затухания амплитуды перемещений δ , определяемого по формуле (3):

$$\delta = \frac{A_z}{A_0}, \quad (3)$$

где A_z — амплитуда на определенной глубине от низа балластной призмы;
 A_0 — амплитуда на основной площадке.

Результаты исследования И. В. Прокудина [9] и результаты расчетов в этой работе сравнивались на основе показателя затухания δ при скорости движения поезда 50 км/ч, сравнение показано на рис. 4.

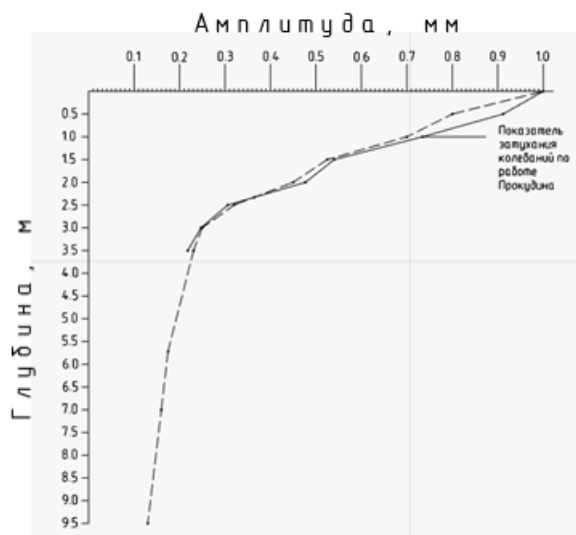


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов показателя затухания амплитуды перемещения δ при скорости движения поезда 50 км/ч

Результат сравнения подтверждает достоверность результатов численного моделирования амплитуды динамического перемещения.

Расчет осадки

Динамический модуль деформации для расчета осадки земляного полотна в данной статье определяется по формуле (4):

$$E_d = E_0 \left[K'_e + K_e \exp(-K'(A - A'')) \right], \quad (4)$$

где E_d — динамический модуль деформации;
 E_0 — модуль деформации, определенный в условиях статической испытаний;
 K'_e — отношение минимального модуля деформации при вибродинамическом воздействии к его значению при статическом нагружении;
 K_e — максимальная величина показателя относительного снижения модуля деформации при вибродинамическом воздействии;
 K' — коэффициент вибродинамического деформирования грунта;

A — амплитуда колебаний при определенном модуле деформации;
 A'' — начальная амплитуда, вызывающая снижение модуля на 3–5 % [9].
 Значения параметров, необходимых для расчета, представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Значения параметров

Параметр	Значение
K'_a	0,35
K_e	0,65
K'	0,007
A''	10

Значения в таблице представлены для твердой супеси.

Для оценки влияния динамического модуля деформации на осадку земляного полотна выполним расчет осадки в следующих условиях:

- 1) осадка от действия собственного веса насыпи с учетом поездной нагрузки в статике;
- 2) осадка от собственного веса насыпи с учетом поездной нагрузки в динамике.

Расчет осадки земляного полотна выполнен методом послойного суммирования по формуле (5):

$$S = \sum_{i=1}^{i=h} \frac{h_i \cdot \sigma_{zi}}{E_i} \beta, \quad (5)$$

где h_i — мощность отдельных слоев грунта;

E_i — модуль деформации грунта в слоях;

σ_{zi} — максимальные сжимающие напряжения в них;

β — коэффициент, зависящий от бокового расширения грунта [10].

Результаты расчета осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна в зимний период представлены на рис. 5 и 6.

По результатам расчета осадки земляного полотна методом послойного суммирования установлено, что величина осадки под действием динамической нагрузки превышает показатель при статической нагрузке на 30 %.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что **динамические нагрузки существенно влияют** на величину осадки земляного полотна, сложенного оттаивающими многолетнемерзлыми грунтами. Расчеты показали: осадка под действием динамической нагрузки значительно выше показателей статического

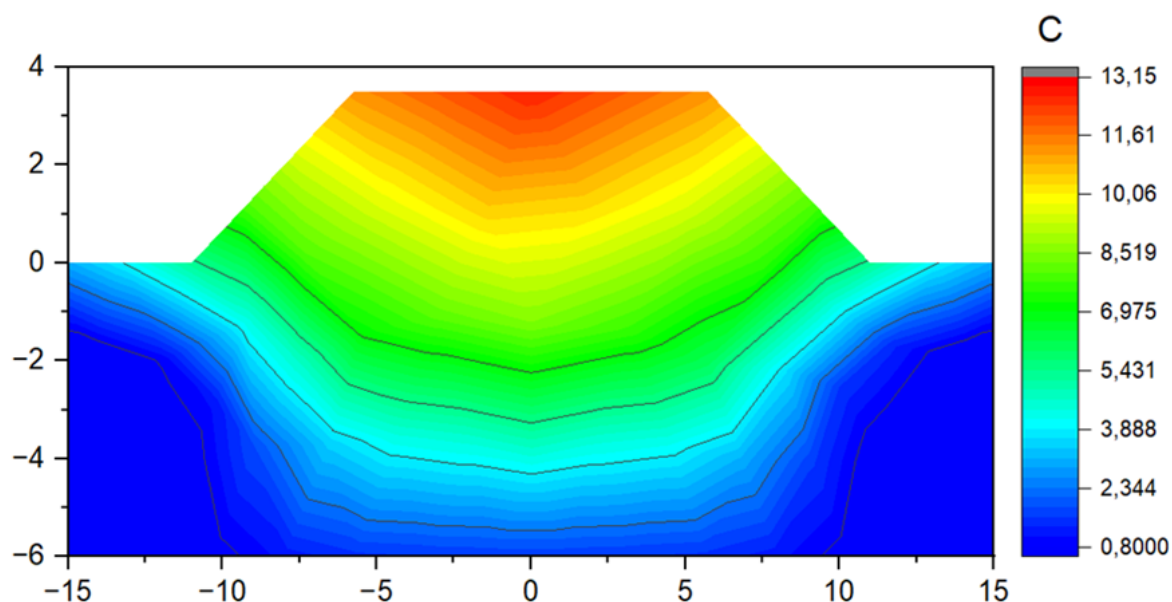


Рис. 5. Осадка земляного полотна под действием статической нагрузки

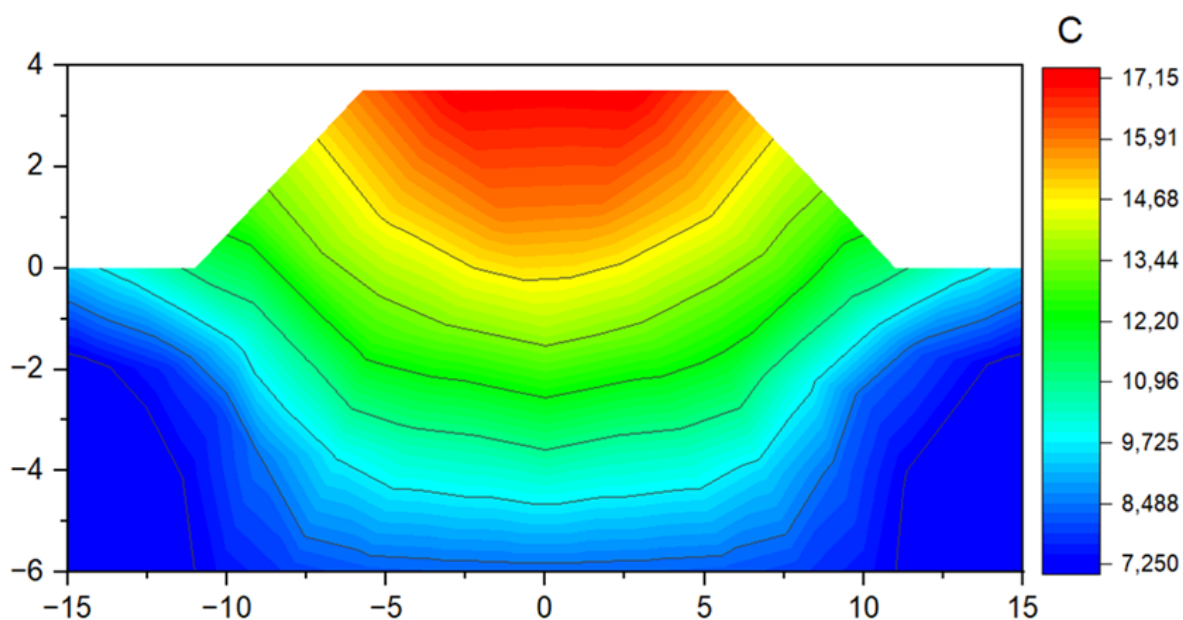


Рис. 6. Осадка земляного полотна с учетом динамической нагрузки

расчета. Это подтверждает необходимость учета динамики нагрузок, особенно при эксплуатации транспортных сооружений на мерзлоте, где изменение свойств грунта при оттаивании может серьезно повлиять на устойчивость конструкции.

Полученные данные подчеркивают важность детальных расчетов с учетом реальных условий работы конструкций в зоне многолетней мерзлоты, включая динамические факторы. Такой подход обеспечит повышение надежности проектируемых объектов и снизит риски деформаций земляного полотна при эксплуатации.

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. Зайцев А. А. Комплексная методика автоматизированной оценки динамической устойчивости железнодорожных насыпей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / А. А. Зайцев. — М., 2000. — 255 с.
3. 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.
4. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. ASTM D1196—93. Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. — 2004.
6. Методические рекомендации по проведению испытаний в приборе трехосного сжатия автоматизированном ГТ 1.3.5 / ООО НПП ГЕОТЕК.
7. ГОСТ Р 56353—2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
8. Сальников В. Б. Теплотехнические расчеты строительных конструкций с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics: учеб.-метод. пособие / В. Б. Сальников, В. А. Беляков; под ред. В. Н. Алехина; М-во образования и науки РФ, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 48 с.
9. 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. — Л., 1982. — 458 с.
10. СП 50-101—2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 12.08.2025

Контактная информация:

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — аспирант; svyatogorova@pgups.ru

КОЛОС Ирина Владимировна — канд. техн. наук, доц.; irina_kolos70@bk.ru

КУЗНЕЦОВА Дарина Романовна — магистр; dkuznetsova@pgups.ru

ВАЛЬЦЕВА Татьяна Юрьевна — канд. техн. наук; [vtu25@mail.ru](mailto:vту25@mail.ru)

Calculation of Permafrost Soil Thaw Settlement under Dynamic Load

A. V. Svyatogorova¹, I. V. Kolos¹, D. R. Kuznetsova¹, T. Yu. Valtseva²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Far Eastern State Transport University, 47 Serysheva str., Khabarovsk, 680021, Russian Federation

For citation: Svyatogorova A. V., Kolos I. V., Kuznetsova D. R., Valtseva T. Yu. Calculation of Permafrost Soil Thaw Settlement under Dynamic Load. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 124–134. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-124-134

Summary

Purpose: To develop a methodology for calculating the thaw settlement of permafrost soils of the railway subgrade under dynamic loads. To conduct a comparative analysis of the calculation results of soil settlement under dynamic loads and traditional calculations based on a static approach. **Method:** The initial parameters for performing settlement calculations were determined through experimental means, by conducting laboratory soil studies in a three-axis compression unit. The numerical finite element method (FEM), implemented in the specialized COMSOL Multiphysics software package, was utilized to simulate the settlement process. This complex enabled consideration of the particularities of the interaction between complex geological conditions and dynamic loads induced by railway transport movement. **Results:** The calculation demonstrated that the degree of railway subgrade settlement under dynamic load significantly exceeds that obtained using the traditional static calculation method. This finding emphasizes the necessity of incorporating dynamic parameters into the assessment of railway embankment stability on permafrost soils. **Practical significance:** It is imperative to consider dynamic loads when assessing the reliability and durability of structures in permafrost regions, as this can significantly affect the overall integrity and longevity of such structures. The implementation of the proposed technique will facilitate the accurate prediction of potential deformation and settlement of the soil foundations, thereby contributing to the prevention of premature degradation and emergency situations. Consequently, the findings of this research will be of significant practical value in enhancing the safety and efficiency of railway construction and operation in permafrost zones.

Keywords: Settlement, railway transport, thawing soils, railway subgrade, dynamic loads, permafrost soils.

References

1. Yurchenko V. A. *Vechnaya merzlota: geokriologicheskie opasnosti i regional'naya degradatsiya merzlykh gruntov* [Perennial 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-merzlyh-gruntov>. (In Russian)
2. Zaytsev A. A. *Kompleksnaya metodika avtomatizirovannoy otsenki dinamicheskoy ustoychivosti zheleznodorozhnykh nasypey: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.06* [Complex methodology for automated assessment of dynamic stability of railway embankments: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.22.06]. Moscow, 2000, 255 p. (In Russian)
3. Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A. et al. Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoy dorogi v usloviyakh vechnoy merzloty [Features of railway route design under permafrost conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 135–142. (In Russian)

4. 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)
5. ASTM D1196—93. Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. 2004.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu ispytaniy v pribore trekhosnogo szhatiya avtomatizirovannom GT 1.3.5* [Methodical recommendations for testing in automated triaxial compression device GT 1.3.5]. OOO NPP GEOTEK. (In Russian)
7. 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)
8. Sal'nikov V. B., Belyakov V. A. *Teplotekhnicheskie raschety stroitel'nykh konstruktsiy s primeneniem programmnogo kompleksa COMSOL Multiphysics: ucheb.-metod. posobie; pod red. V. N. Alekhina* [Thermal engineering calculations of building structures using COMSOL Multiphysics software package; ed. by V. N. Alekhina]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2016, 48 p. (In Russian)
9. 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 earthwork made of clay soils under vibrodynamic load: dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.22.06]. Leningrad, 1982, 458 p. (In Russian)
10. SP 50-101—2004. *Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [SP 50-101—2004. Design and construction of foundations and bases of buildings and structures]. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: August 12, 2025

Author's information:

Anastasia V. SVYATOGOROVA — Postgraduate Student; svyatogorova@pgups.ru

Irina V. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; irina_kolos70@bk.ru

Darina R. KUZNETSOVA — Master's Degree Student; dkuznetsova@pgups.ru

Tatiana Yu. VALTSEVA — PhD in Engineering; vtu25@mail.ru