

В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов, А. А. Васильченко, А. В. Мозговой

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗАМОРОЗКЕ *

Аннотация. Работа посвящена количественной оценке совместного влияния влажности, коэффициента уплотнения и количества циклов заморозки на деформационные характеристики глинистых грунтов. Исследования выполнены в лабораторных условиях. Подготовлены образцы грунта, имеющие различную влажность в диапазоне от 14 до 25 % и коэффициент уплотнения от 0,93 до 1,06, после чего они были подвергнуты различному числу циклов заморозки (1–6 циклов), также испытывались контрольные образцы, не подверженные циклам заморозки. Все образцы были испытаны в компрессионном приборе с нагрузкой от 0 до 0,6 МПа. По результату обработки и анализа протоколов испытаний получены зависимости деформаций образцов от нагрузки при разных сочетаниях исходных свойств грунтовых образцов. Отмечено, что на увеличение деформаций оказывают влияние все рассмотренные факторы, а связь деформаций с влажностью при всех рассмотренных коэффициентах уплотнения возрастает с увеличением циклов заморозки, при этом связь деформаций с коэффициентом уплотнения во всем диапазоне влажности снижается.

Ключевые слова: глинистый грунт, заморозка, земляное полотно, деформации, влажность, компрессионные испытания.

Для цитирования: Изменение деформационных характеристик грунтов при циклической заморозке / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 73–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_73.

Введение

Грунтовые объекты различного назначения, как правило, функционируют в условиях воздействия внешних факторов, к которым относятся и факторы природного характера. Эти факторы оказывают воздействия на грунты, слагающие сооружения, и могут влиять на их стабильность [1, 2]. К грунтовым объектам в том числе относят и земляное полотно автомобильных и железных дорог. В зависимости от территориального расположения объекта воздействия на него могут иметь различный характер. Одними из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на стабильность и устойчивость земляного полотна, можно считать атмосферные осадки и температуру. Атмосферные осадки, помимо влияния на гидрологию водотоков, создающих при определенных условиях предпосылки для размыва грунтов земляного полотна, также могут способствовать накоплению влаги в грунте, что приведет к ухудшению физико-механических характеристик и снижению несущей способности. Фактор температурного воздействия на земляное полотно в большей степени можно отнести к воздействию отрицательных температур или многократных циклов заморозки и разморозки грунта. Промерзание грунта приводит к образованию льда из поровой воды с увеличением объема грунта с образованием пучин. Повторяющийся цикл перехода температуры через ноль приводит к разуплотнению грунта [3–6].

Целью настоящего исследования является количественная оценка совместного влияния влажности, коэффициента уплотнения и количества циклов заморозки на деформационные характеристики глинистых грунтов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала использован глинистый грунт. Грунтовый материал нарушенного строения отбирался из тела строящейся насыпи. Свойства грунта исследованы традиционными лабораторными методами в соответствии с действующими нормативными документами. Были определены фракционный состав,

* Исследование выполнено при поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (соглашение № 109-03-2026-007/1).

физико-механические, классификационные и прочностные свойства материала. На рис. 1 приведены параметры грунта, необходимые для его классификации и исследования деформаций при приложении механических нагрузок. Классификация грунта выполнена согласно ГОСТ 25100-2011.

Значение числа пластичности (IP) составило 21,59 % (см. рис. 1), что позволило классифицировать материал как глину легкую, пылеватую.

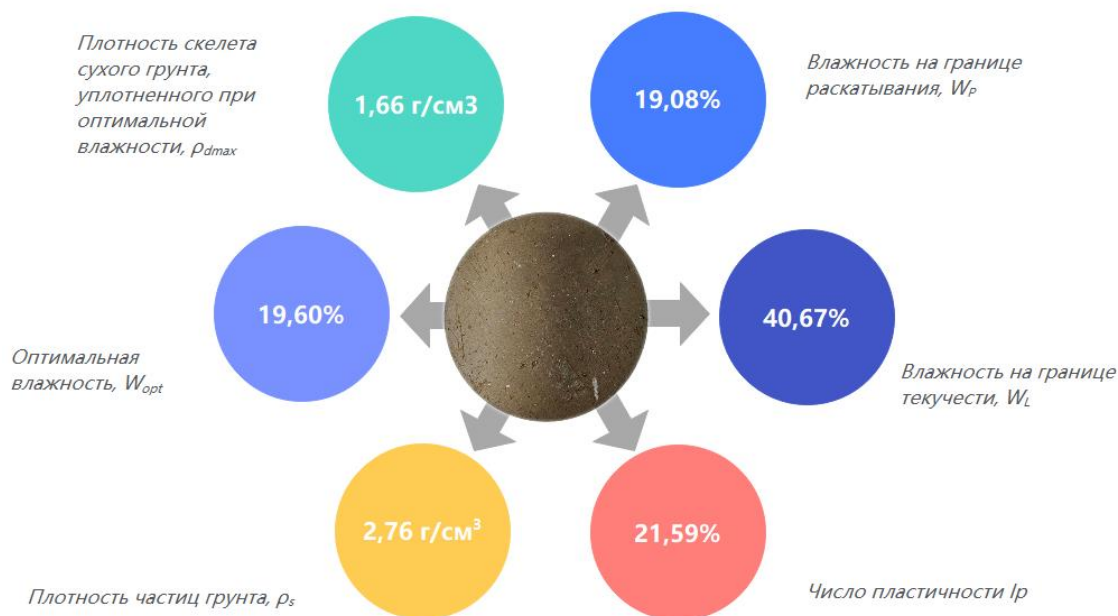


Рис. 1. Параметры грунта

Пробоподготовка выполнялась в приборе предварительного уплотнения. На первом этапе изготавливались образцы с различным коэффициентом уплотнения (от 0,93 до 1,06) при оптимальной влажности (19,6 %). После чего часть образцов дополнительно либо увлажнялась, либо высушивалась, при этом влажность образцов перед испытаниями составляла от 14 до 25 %. Изготовленные образцы подвергались различному количеству циклов заморозки/разморозки (1, 3, 6 циклов) в морозильной камере. Всего было изготовлено и испытано 36 образцов.

В работе для оценки деформаций образцов грунта (сжимаемости) использовался компрессионный метод с использованием установки компрессионного сжатия. Диапазон давлений, при котором проводились испытания, составлял от 0 до 0,6 МПа.

Обсуждение результатов

При сооружении земляного полотна проектными документами регламентируется влажность грунта и его коэффициент уплотнения. Коэффициент уплотнения устанавливается в зависимости от строящегося сооружения и может меняться в зависимости от расположения уплотняемого слоя. Обычно верхние слои земляного полотна имеют коэффициент уплотнения, близкий к единице ($K_{уп} = 0,98-1,00$). Влажность задается оптимальной для каждого типа грунта, а ее точное значение определяется лабораторными методами.

Рассмотрим полученные деформации образца грунта с $K_{уп}$, равным 1,00, при различной влажности и подвергнутых различному количеству циклов заморозки. Полученные данные были сгруппированы по влажности со значениями, близкими к 14, 19 и 24 %, рассмотрены образцы, которые не подвергались заморозке и замороженные 1, 3 и 6 раз. На рис. 2–4 приведены графики зависимости деформаций от нагрузки на образец при различной влажности и количестве циклов заморозки/разморозки.

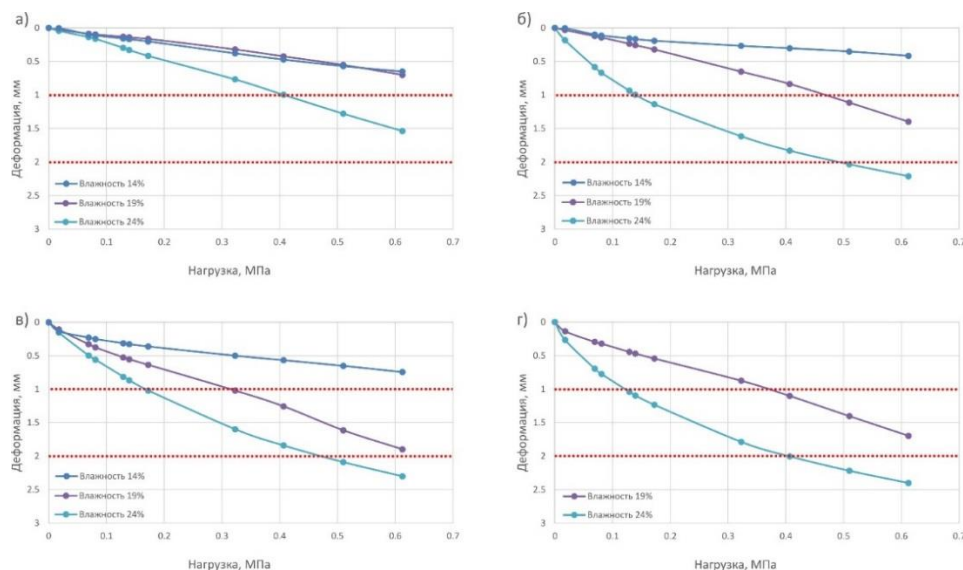


Рис. 2. Графики зависимости деформаций образцов от приложенной нагрузки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 0,96$:
 а – контрольный образец, б – после одного цикла заморозки/разморозки ($N_c = 1$), в – после трех циклов заморозки/разморозки ($N_c = 3$), г – после шести циклов заморозки/разморозки ($N_c = 6$)

На рис. 2 приведены данные для образца, имеющего самый низкий коэффициент уплотнения из рассмотренных в работе, его значение составляет 0,96, что в практике не должно допускаться, а грунт с таким коэффициентом уплотнения считается неуплотненным. Поведение грунта на контрольном образце демонстрирует рост деформаций с увеличением нагрузки, при этом грунты с влажностью 14 и 19 % ведут себя схоже, это связано с тем, что влажность грунта была близкой или ниже влажности на границе раскатывания, а грунт с влажностью 24 % при максимальной нагрузке деформируется почти в три раза сильнее 0,65–0,70 против 1,54 мм. При этом расхождение становится более заметным и нарастает после нагрузки 0,11 МПа.

Заморозка образцов оказывает влияние уже при первом цикле, увеличивая деформации для всех значений влажности. Так, грунт с влажностью 24 % деформируется при одном цикле в 1,44 раза больше, а при 6 циклах – в 1,56 раза. При этом наименьшее влияние количества циклов заморозки/разморозки сказывается на менее влажных грунтах, что можно объяснить меньшим количеством сформированных кристаллов льда в объеме образца.

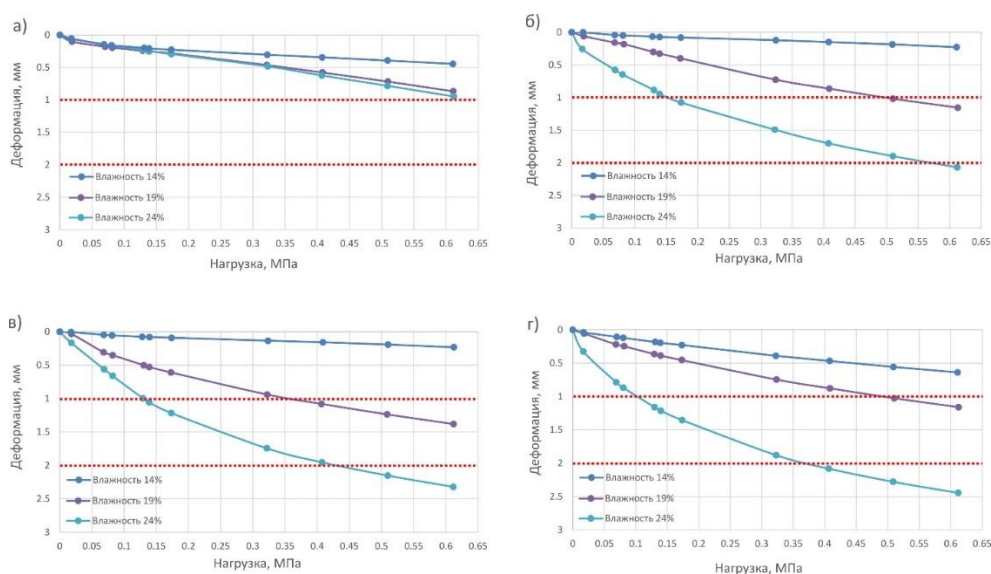


Рис. 3. Графики зависимости деформаций образцов от приложенной нагрузки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 1,0$:
 а – контрольный образец, б – после одного цикла заморозки/разморозки ($N_c = 1$), в – после трех циклов заморозки/разморозки ($N_c = 3$), г – после шести циклов заморозки/разморозки ($N_c = 6$)

Аналогичные зависимости можно наблюдать и в случае с образцом, имеющим максимальную плотность ($K_{уп} = 1,0$). На рис. 3 видно, что контрольный образец при высоких значениях влажности деформировался в несколько раз меньше, чем образцы, подверженные заморозке. Этот эффект растет с количеством циклов, причем наибольший прирост деформаций наблюдается также на первых циклах. С увеличением циклов прирост деформаций уменьшается.

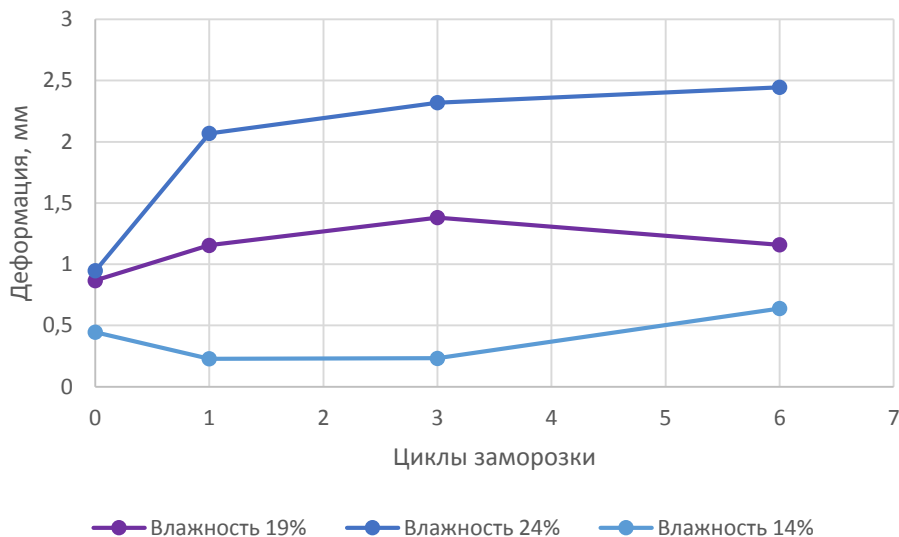


Рис. 4. Графики зависимости максимальных деформаций образцов от количества циклов заморозки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 1,00$

Дополнительно на рис. 4 приведены графики зависимости значений максимальных деформаций от количества циклов заморозки для грунтов с различной влажностью и $K_{уп} = 1,0$. Рис. 4 также демонстрирует увеличение деформаций как при увеличении влажности образцов, так и с увеличением количества циклов заморозки.

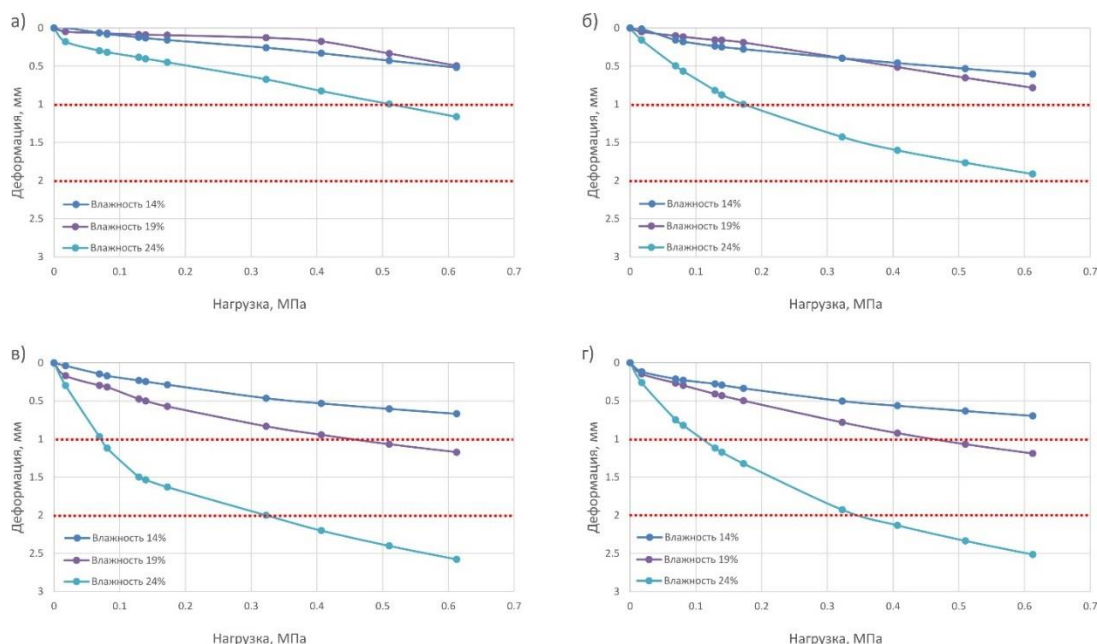


Рис. 5. Графики зависимости деформаций образцов от приложенной нагрузки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 1,03$:

а – контрольный образец, *б* – после одного цикла заморозки/разморозки ($N_c = 1$), *в* – после трех циклов заморозки/разморозки ($N_c = 3$), *г* – после шести циклов заморозки/разморозки ($N_c = 6$)

На рис. 5 приведены результаты испытания образцов, имеющих наибольшую плотность, когда при пробоподготовке грунт переуплотнялся и имел $K_{уп} = 1,03$. В общем поведение образцов грунта схоже с описанными выше, но можно отметить некоторые особенности. Например, грунт с влажностью 14 и 19 % деформируется меньше, а однократная заморозка на переуплотненный грунт оказывает меньшее влияние по сравнению с образцами с коэффициентами уплотнения, равными 0,96 и 1,00. Можно отметить, что кривые деформаций грунта с высокой влажностью после 6 циклов заморозки имеют практически одинаковое поведение и величину максимальной деформации (таблица).

Деформации при нагружении образца с влажностью 24 % после 6 циклов нагружения при различных коэффициентах уплотнения

№, п/п	Коэффициент уплотнения	Деформация, мм
1	0,96	2,40
2	1,00	2,45
3	1,03	2,51

Следует отметить, что при изготовлении образцов с заданными свойствами (влажность, коэффициент уплотнения) при контрольных замерах были выявлены отклонения от заданных параметров. Эти отклонения можно оценить для влажности $\Delta_w = 2\%$, для коэффициента уплотнения $\Delta_{K_{уп}} = 1\%$.

Если рассмотреть общую совокупность полученных данных, то можно построить зависимости деформаций отдельно для зависимости деформаций от влажности и коэффициента уплотнения. Выполнив линейную аппроксимацию, можно получить уравнения для определения деформаций в зависимости от значений рассматриваемых переменных. На рис. 6 и 7 точками отмечены полученные лабораторно значения максимальных деформаций в зависимости от влажности и коэффициента уплотнения, пунктирной наклонной линией указана линейная аппроксимация экспериментальных данных.

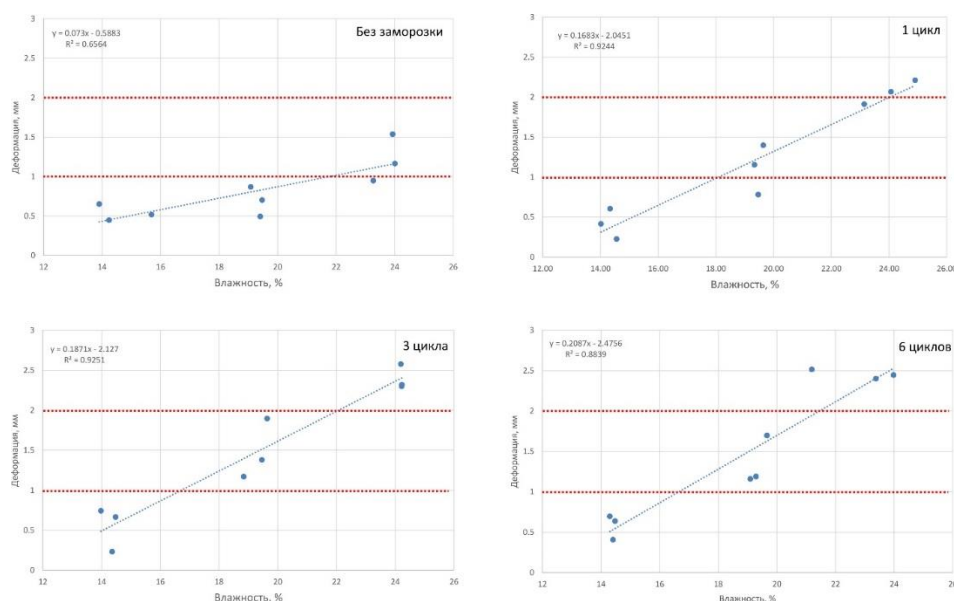


Рис. 6. График зависимости деформаций от влажности образца в диапазоне испытанных значений $K_{уп}$

На графиках зависимости деформаций от влажности образца, приведенного на рис. 6, виден рост деформаций с увеличением влажности. Более ярко этот эффект выражен в образцах, подверженных циклам заморозки. При этом линейная аппроксимация для контрольных образцов показывает меньшее значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,7$), в то время как для образцов, подверженных циклам заморозки, данные линейно аппроксимируются с коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,9$). Такой эффект можно связать с тем, что в процессе заморозки/разморозки изменяется структура грунта, делая его поведение под нагрузкой более предсказуемым.

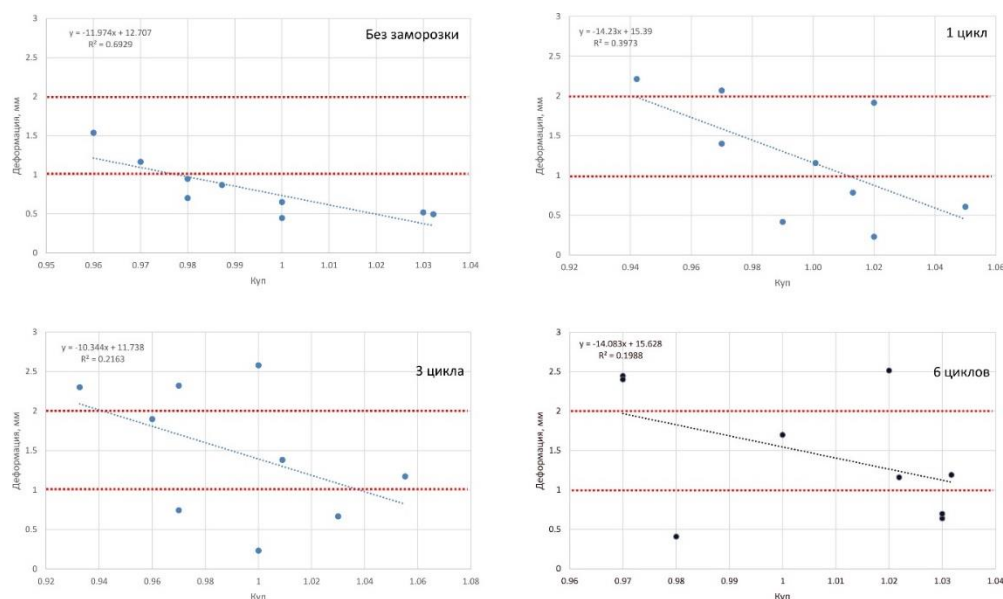


Рис. 7. График зависимости деформаций от $K_{уп}$ образца в диапазоне испытанных значений влажности

На графиках зависимости деформаций от коэффициента уплотнения образца, приведенного на рис. 7, наблюдается уменьшение деформаций с увеличением коэффициента уплотнения. Линейная аппроксимация на контрольном образце также дает значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,7$), однако после циклических воздействий температуры с каждым последующим циклом коэффициент детерминации уменьшается и после 6 циклов составляет $R^2 = 0,2$.

Выводы

По результату выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- Грунты с влажностью близкой или ниже влажности на границе раскатывания ведут себя схоже под действием нагрузки, а грунт с влажностью 24 % при максимальной нагрузке деформируется почти в три раза сильнее (0,65–0,70 против 1,54 мм).
- Влияние заморозки на значение деформаций сказывается при первом цикле увеличивая деформации для всех значений влажности.
- На увеличение деформаций оказывает влияние все рассмотренные факторы.
- Грунт с коэффициентом уплотнения 1,03 и влажностью 14 и 19 % при однократной заморозке меньше подвержен влиянию по сравнению с образцами с коэффициентами уплотнения, равными 0,96 и 1,00.
- Связь деформаций с влажностью при всех рассмотренных коэффициентах уплотнения возрастает с увеличением циклов заморозки при этом, связь деформаций с коэффициентом уплотнения во всем диапазоне влажности снижается.
- Учитывая влияния на деформации нескольких факторов, таких как влажность образца и его начальное уплотнение, а также количество циклов заморозки, целесообразно выполнить факторный анализ и оценить влияние этих факторов и их вклад в деформации образцов грунта.

Список литературы

- 1 Сулейманова, М. А. Факторы, вызывающие повреждения и дефекты в земляном полотне железных дорог / М. А. Сулейманова, Д. Х. Худойкулов, Ш. Р. Махмадов // Политехнический вестник. Серия : инженерные исследования. – 2017. – № 3 (39). – С. 53–62. – ISSN 2520-2227.
- 2 Кафитин, Л. И. Воздействие просадочности на железнодорожный путь и способы борьбы с этим явлением / Л. И. Кафитин, Н. В. Хамидуллина //

References

- 1 Suleimanova, M. A. Factors causing damage and defects in the subgrade of railways / M. A. Suleimanova, D. Kh. Khudoykulov, Sh. R. Makhmadov // Polytechnic Bulletin. Series : Engineering Studies. – 2017. – No. 3 (39). – P. 53–62. – ISSN 2520-2227.
- 2 Kafitin, L. I. The impact of subsidence on railway tracks and methods for combating this phenomenon / L. I. Kafitin, N. V. Khamidullina //

Сборник научных трудов V Всероссийской национальной научно-практической конференции «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры». – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 80–84. – ISBN 978-5-907295-80-3.

3 **Болдырев, Г. Г.** Влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность и деформируемость мерзлых грунтов: состояние вопроса / Г. Г. Болдырев, И. Х. Идрисов // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – С. 6–17. – ISSN 1993-5056.

4 **Кузьмин, Г. П.** Зависимость между характеристиками физических свойств мерзлых и талых грунтов / Г. П. Кузьмин, В. Н. Панин ; Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова // Наука и образование. – 2008. – № 1 (49). – С. 38–40. – ISSN 2073-8129.

5 **Ратькова, Е. И.** Воздействие циклов «замораживание – оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии / Е. И. Ратькова, В. С. Сюнев, В. К. Катаров // Resources and Technology. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 73–89. – ISSN 2307-0048.

6 **Ковалева, Н. В.** Исследование влияния циклов «замораживание – оттаивание» на характеристики лесных почво-грунтов, используемых при строительстве лесных дорог / Н. В. Ковалева, В. К. Катаров, Е. И. Ратькова // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 3–3(8–3). – С. 176–180. – DOI 10.12737/4221.

// Collection of scientific papers of the V All-Russian national scientific and practical conference “Innovative technologies in construction and management of the technical condition of infrastructure”. – Rostov-on-Don, 2023. – P. 80–84. – ISBN 978-5-907295-80-3.

3 **Boldyrev, G. G.** The influence of cyclic freezing-thawing on the strength and deformability of frozen soils : state of the art / G. G. Boldyrev, I. Kh. Idrisov // Engineering Geology. – 2017. – No. 3. – P. 6–17. – ISSN 1993-5056.

4 **Kuzmin, G. P.** Relationship between the characteristics of the physical properties of frozen and thawed soils / G. P. Kuzmin, V. N. Panin ; Melnikov Permafrost Institute // Science and Education. – 2008. – No. 1 (49). – P. 38–40. – ISSN 2073-8129.

5 **Ratkova, E. I.** Impact of freeze-thaw cycles on deformation properties of forest soils of Karelia / E. I. Ratkova, V. S. Sunev, V. K. Katarov // Resources and Technology. – 2013. – Vol. 10, No. 1. – P. 73–89. – ISSN 2307-0048.

6 **Kovaleva, N. V.** Study of the influence of freeze-thaw cycles on the characteristics of forest soils used in the construction of forest roads / N. V. Kovaleva, V. K. Katarov, E. I. Ratkova // Current areas of scientific research in the 21st century : theory and practice. – 2014. – Vol. 2, No. 3–3(8–3). – P. 176–180. – DOI 10.12737/4221.

V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov, A. A. Vasilchenko, A. V. Mozgovoy

CHANGES IN SOIL DEFORMATION PROPERTIES DURING CYCLIC FREEZING

Abstract. This study quantitatively evaluates the combined effects of moisture content, compaction coefficient, and the number of freeze-thaw cycles on the deformation properties of clayey soils. The study was conducted under laboratory conditions. Soil samples with varying moisture contents ranging from 14% to 25% and compaction coefficients from 0.93 to 1.06 were prepared and subjected to varying numbers of freeze-thaw cycles (1–6 cycles). Control samples not subjected to freeze-thaw cycles were also tested. All samples were tested in a compression tester with loads ranging from 0 to 0.6 MPa. Based on the processing and analysis of test reports, dependences of sample deformations on load were obtained for different combinations of initial soil sample properties. It was noted that all the factors considered influence the increase in deformations, and the relationship between deformations and moisture content for all compaction coefficients considered increases with increasing freezing cycles, while the relationship between deformations and compaction coefficients decreases across the entire moisture content range.

Keywords: clayey soil, freezing, subgrade, deformations, moisture content, compression testing.

For citation: Changes in soil deformation properties during cyclic freezing / V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 73–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_73.

Сведения об авторах**Шаповалов Владимир Леонидович**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Окост Максим Викторович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование
и строительство железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: okostmv@rgups.ru

Морозов Андрей Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Васильченко Андрей Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
аспирант,
e-mail: zmandr@mail.ru

Мозговой Алексей Валерьевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
Военный учебный центр,
заместитель начальника кафедры,
e-mail: mozgovoy77@yandex.ru

Information about the authors**Shapovalov Vladimir Leonidovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Survey, Design and Construction
of Railroads”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: okostmv@rgups.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Physics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Vasilchenko Andrey Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: zmandr@mail.ru

Mozgovoy Alexey Valerievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Military Training Center,
Deputy Head of the Chair,
e-mail: mozgovoy77@yandex.ru