

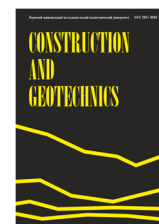


пермский
политех

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 3, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.3.04

УДК 624.139

К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ СЕЗОННОМУ ПРОМЕРЗАНИЮ И ОТТАИВАНИЮ. ОПЫТ ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.В. Обшарова¹, А.Б. Пономарев^{1,2}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июля 2025
Одобрена: 29 августа 2025
Принята к публикации:
10 сентября 2025

Ключевые слова:

армирование, геосинтетика,
морозное пучение, оттаивание
грунта, стальное волокно, сизалевое
волокно, геомембрана, геотекстиль,
георешетка.

АННОТАЦИЯ

Описан опыт зарубежных исследований грунтов, подверженных сезонному промерзанию и оттаиванию (США, Китай, Монголия, Канада). Рассмотрены исследования и изменения грунтов, подверженных циклам замораживания – оттаивания. Влияние циклов замораживания – оттаивания на прочностные, динамические и деформационные характеристики, в том числе на морозное пучение и последующее оттаивание грунтов. Приведены результаты исследований армированных грунтов (глин, песков, илов), подверженных циклам замораживания – оттаивания. Испытания проводились в лабораторных условиях, создавались модели эксперименты и проводились численные эксперименты в программах.

У армированных грунтов были исследованы динамические характеристики на динамических трехосных испытательных установках, прочностные характеристики на сдвиговых приборах в низкотемпературных помещениях, морозное пучение и оттаивание на стандартных приборах для определения морозного пучения и на приборах собственного производства, в том числе было исследовано влияние циклов замораживания-оттаивания на эти характеристики. Некоторые эксперименты описаны подробно. В качестве армирования в экспериментах участвовали геосинтетические материалы. Среди геосинтетических материалов выбраны: геосетки, георешетки, коротковолокнистый, длиноволокнистый и водоотводящий геотекстиль, геомембрана, двухслойная композитная геомембрана. Помимо армирования грунтов стандартными листовыми геосинтетиками, одним из способов улучшения свойств грунтов является смешивание грунта с другими материалами, такими как зола-уноса, известь, полимерные волокна, цемент, кремнезем, резиновые частицы, в статье даны краткие результаты исследования добавления их в грунт. Также описаны результаты исследований морозного пучения при смешивании грунта со стальными и сизалевыми волокнами. Кратко изложены результаты внедрения геотекстиля и геосетки при строительстве автомобильных и железных дорог.

© Обшарова Александра Витальевна – старший преподаватель, e-mail: Lybra013@yandex.ru.

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: andreypab@mail.ru.

Alexandra V. Obsharova – senior lecturer, e-mail: Lybra013@yandex.ru.

Andrey B. Ponomaryov – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: andreypab@mail.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ON THE ISSUE OF STUDYING THE REINFORCEMENT OF SOILS SUBJECT TO SEASONAL FREEZING AND THAWING. EXPERIENCE OF FOREIGN RESEARCH

A.V. Obsharova¹, A.B. Ponomaryov^{1,2}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 July 2025
Approved: 29 August 2025
Accepted for publication:
10 September 2025

Keywords:

reinforcement, geosynthetics,
frost heaving, soil thawing, steel
fiber, sisal fiber, geomembrane,
geotextile, geogrid.

ABSTRACT

The article describes the experience of foreign studies of soils subject to seasonal freezing and thawing (USA, China, Mongolia, Canada). The article examines the studies and changes in soils subject to freeze-thaw cycles. The effect of freeze-thaw cycles on strength, dynamic and deformation characteristics, including frost heaving and subsequent thawing of soils. The article presents the results of studies of reinforced soils (clays, sands, silts) subject to freeze-thaw cycles. The tests were carried out in laboratory conditions, experimental models were created and numerical experiments were carried out in programs.

The dynamic characteristics of reinforced soils were studied on dynamic triaxial test rigs, strength characteristics on shear devices in low-temperature rooms, frost heave and thaw on standard devices for determining frost heave and on devices of our own production, including the influence of freeze-thaw cycles on these characteristics. Geosynthetic materials were used as reinforcement in the experiments. Among the geosynthetic materials selected were: geogrids, geogrids, short-fiber, long-fiber and water-draining geotextiles, geomembrane, two-layer composite geomembrane. In addition to soil reinforcement with standard sheet geosynthetics, one of the ways to improve soil properties is to mix soil with other materials such as fly ash, lime, polymer fibers, cement, silica, rubber particles, the article provides brief results of a study of adding them to the soil. The results of frost heaving studies when mixing soil with steel and sisal fibers are also described. The results of the introduction of geotextiles and geogrids in the construction of roads and railways are briefly described.

Введение

В связи с почти повсеместным распространением сезонного промерзания грунтов на территории Российской Федерации (кроме Крайнего Севера и юга Сибири), а также в северных странах (Канада, штат Аляска США, скандинавские страны, Монголия, Китай) обеспечение устойчивости и нормальной эксплуатации зданий и сооружений является актуальной проблемой. Многочисленные конструкции, расположенные в основании грунта и на его поверхности, должны быть приспособлены к воздействию морозного пучения, способны воспринять его без критических последствий или же полностью или частично ограждены от этого воздействия. Данная проблема существенна для малоэтажных зданий на фундаментах мелкого заложения, а также для железных и автомобильных дорог, аэродромов и гидромелиоративных сооружений, ЛЭП и легких сельскохозяйственных построек [1; 2]. Промерзание грунта начинается с понижением температуры воздуха ниже нуля градусов до выпадения постоянного снежного покрова. Глубина сезонного промерзания – для каждого региона индивидуальна и зависит от многих факторов, таких как: климат, рельеф местности, розы ветров, количества выпадающих осадков и т.д. На территории Российской Федерации, например, глубина сезонного промерзания колеблется от 30 см до 2,9 м [3]. Сезоннопромерзающие грунты уязвимы к многократному промерзанию и оттаиванию. Попеременно повторяющийся процесс замерзания и оттаивания воды, содержа-

щейся на поверхности и внутри грунта – это цикл замораживания – оттаивания. При воздействии циклов промерзания и оттаивания эти грунты могут представлять опасность для инженерных сооружений и нанести серьезный экономический ущерб. Изучением влияния циклов замораживания – оттаивания на сегодняшний день во многом занимаются китайские ученые: А.Н. Sweida, I.M. Din, B. Sun и др. [4–6].

В своих работах I.M. Din и B. Sun [5; 6] отмечают, что основными факторами, влияющими на интенсивность повреждения грунта циклами замораживания – оттаивания, являются структура грунта, степень уплотнения, влажность, температура замерзания и время цикла замораживания – оттаивания. Процесс замораживания – оттаивания грунта сопровождается гидротермальным переносом, а состав твердой, жидкой и газовой фазы является основой перехода и миграции воды в процессе циклов, как описано в работах А.Н. Sweida, L. Wang [4; 7]. Фазовые изменения в грунтовой влажности между частицами грунта являются основным фактором, определяющим свойства грунта в условиях цикла замораживания – оттаивания. Таким образом, постоянные изменения в грунтовой влажности во время циклов приводят к изменениям физических, химических и биологических свойств грунтов. Поровая вода (рис. 1, а) в грунтовой среде замерзает ниже 0 °С, жидкая водная фаза превращается в лед, и объем увеличивается на 9 %. Образование льда сжимает окружающие частицы, а расширение кристаллов льда в порах грунта во время замерзания разрывает связь между частицами грунта, что разрушает его структуру (рис. 1, b).

Замерзание сначала происходит на поверхности грунта, а затем постепенно распространяется вниз (рис. 1, c). Более того, вода транспортируется из окружающей среды, которая имеет высокий водный потенциал, к поверхности замерзания (рис. 1, d). Это движение влаги к поверхности постепенно увеличивает влагосодержание замороженного слоя. Во время оттаивания талая вода на поверхности испаряется и перемещается вниз к слоям с более низким водным потенциалом, что приводит к снижению содержания влаги в грунте – такие выводы приведены в работах B. Sun [8].

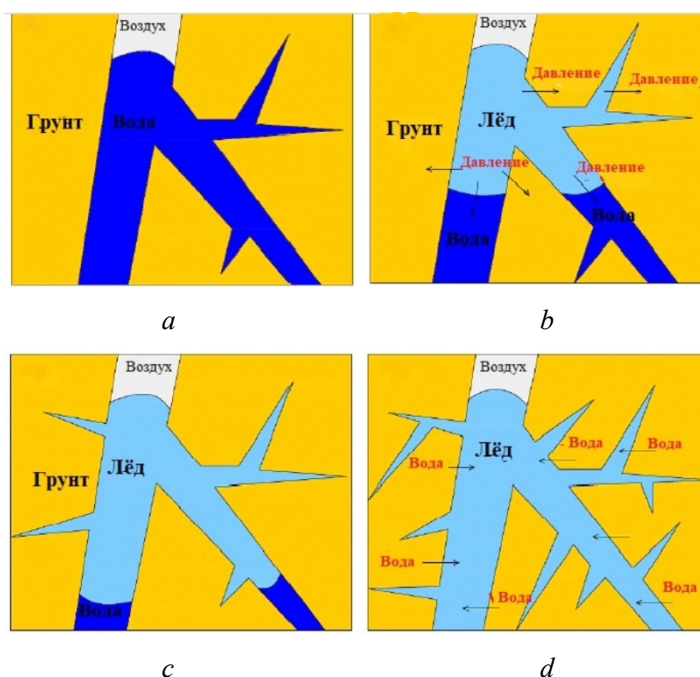


Рис. 1. Изменение фазового состава и миграция влаги в процессе заморзания – оттаивания по B. Sun [6]

Fig. 1. Soil moisture phase change and migration during the freezing-thawing process to B. Sun [6]

В своих работах В. Sun и Z. Jie [8; 9] описывают влияние циклов на коэффициент пористости грунтов. Частые колебания фаз медленно изменяют коэффициент пористости грунтов, влияя на объемную плотность. С помощью сканирования и цифровой обработки изображений В. Sun [6] изучил трехмерную структуру грунтовых агрегатов, а также количественно охарактеризовал связность и сложность внутренних пор (рис. 2). Пористость грунта увеличилась с 7,8 до 23,34 % после 20 циклов замораживания – оттаивания.

Изучением деформационных характеристик занимались L.M. Kong, Y. Lu и др. [10; 11]. Во время циклов замораживания – оттаивания выявлено, что процесс замораживания можно разделить на этапы предварительного замораживания, основного и вторичного замораживания в зависимости от соотношения между морозным пучением и временем. Примечательно, что на продолжительность этапа предварительного замораживания влияет нагрузка, при этом этап предварительного замораживания грунта без нагрузки значительно короче, чем с нагрузкой. L. Huang [12] предполагает, что нагрузка может компенсироваться частью нагрузки, которая вызвана морозным пучением. Грунты с разными нагрузками ведут себя по-разному.

L. Huang [12], T. Li и др. [13] в своих работах приходят к следующим выводам. С увеличением количества циклов замораживания – оттаивания без нагрузок относительная деформация пучения уменьшается, а относительная деформация морозного пучения грунта под давлением ниже 10 кПа увеличивается незначительно и достигает равновесия после шестого цикла. Однако состояние равновесия достигается во втором цикле замораживания – оттаивания для грунта с нагрузкой больше или равной 30 кПа.

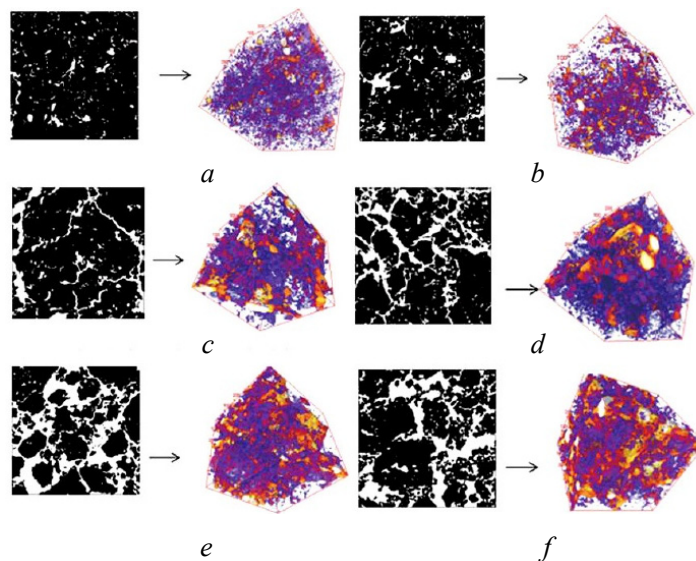


Рис. 2. 2D- и 3D-визуализации структур грунтовых агрегатов при различных циклах замораживания – оттаивания по В. Sun [6]: до замораживания – оттаивания (а), после 1-го цикла замораживания – оттаивания (b), после 5 циклов (c), после 10 циклов (d), после 15 циклов замораживания – оттаивания (e), после 20 циклов замораживания – оттаивания (f). Белая часть 2D-изображения – это поры, а черная часть – твердые частицы; желтая часть 3D-изображения – это поры на ребрах куба, а фиолетовая часть – внутренние поры

Fig. 2. 2D- and 3D-visualisations of the soil aggregate structures under different freeze-thaw cycles to Sun B. [6]: before the freeze-thaw (a), after the first freeze-thaw cycle (b), after 5 freeze-thaw cycles (c), after 10 freeze-thaw cycles (d), after 15 freeze-thaw cycles (e), after 20 freeze-thaw cycles (f) The white part of the 2D image is the pore, and the black part is the solid particle; the yellow part of the three-dimensional image is the cube edge pores, and the purple part is the inner pores

Содержание незамерзшей воды уменьшается с понижением температуры, и при температуре -15°C содержание незамерзшей воды составляет 10,4 %. В условиях меньшей нагрузки эффект расширения, вызванный ростом льда в грунте, превышает эффект сжатия, вызванный оттаиванием, поэтому объем увеличивается после восьми циклов замораживания – оттаивания. Для грунта с большей нагрузкой деформация морозного пучения ограничивается дополнительной нагрузкой при замерзании, а нагрузка способствует сжатию при оттаивании. В результате объем снижается после восьми циклов замораживания – оттаивания [13].

После циклов замораживания – оттаивания в грунте образуются трещины, которые раскалывают весь грунт на мелкие фрагменты, в результате чего грунт становится рыхлым. Когда нагрузки превышают 30 кПа, происходит повторное сжатие мелких пор. Грунты восстанавливают относительно стабильную пористую структуру после циклов замораживания и оттаивания. Когда нагрузка более 100 кПа, поровая структура грунта плотная [12].

Широкое изучение динамических характеристик грунтов автодорог, подверженных морозному пучению, отражены в работах Z. Yang [14; 15], T. Liu [16]. Сезонно мерзлые грунтовые основания находятся под двойным влиянием транспортной нагрузки и процесса замораживания – оттаивания. Уменьшение прочности земляного полотна после процесса замораживания – оттаивания может привести к дорожным катастрофам и увеличить риск просадок. В реальных условиях нагрузки транспортных средств на грунты земляного полотна случайны по времени и амплитуде из-за смешанных типов транспортных средств на дорогах, а ударная транспортная нагрузка может вызывать серьезную деформацию земляного полотна.

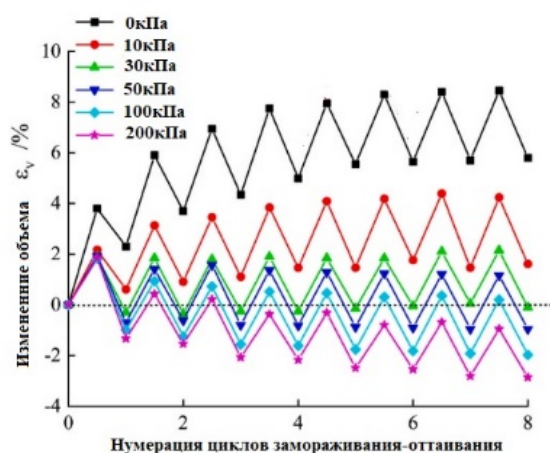


Рис. 3. Изменение объема в зависимости от количества циклов замораживания – оттаивания по T. Li [16]

Fig. 3. Volume change versus the number of freeze-thaw cycles to T. Li [16]

Поэтому крайне важно исследовать ударную транспортную нагрузку, особенно учитывая эффекты сцепления процесса замораживания – оттаивания. По данным динамических трехосных испытаний Z. Yang [15] были изучены характеристики остаточной деформации грунта под действием процесса замораживания – оттаивания и ударных транспортных нагрузок (рис. 4). Также в работах T. Liu [16] и J. Wang [17] исследованы изменения амплитуд нагрузки и остаточных деформаций грунта при различных последовательностях нагружения до и после процесса замораживания – оттаивания. В процессе различных последовательностей нагрузок остаточная деформация грунта значительно увеличивалась.

Время приложения пиковой нагрузки влияло на деформацию грунта земляного полотна. Остаточные деформации грунта до и после процесса замораживания – оттаивания экспоненциально увеличивались с амплитудой ударной нагрузки от движения. Влияние процесса замораживания – оттаивания на остаточную деформацию грунта имело тенденцию к стабилизации. Процесс замораживания – оттаивания увеличивал остаточную деформацию примерно на 10 %. После небольшой предварительной нагрузки после заданной вибрации эффект процесса замораживания – оттаивания был меньше. Остаточная деформация, как правило, стабилизировалась и увеличивалась примерно на 10 %.

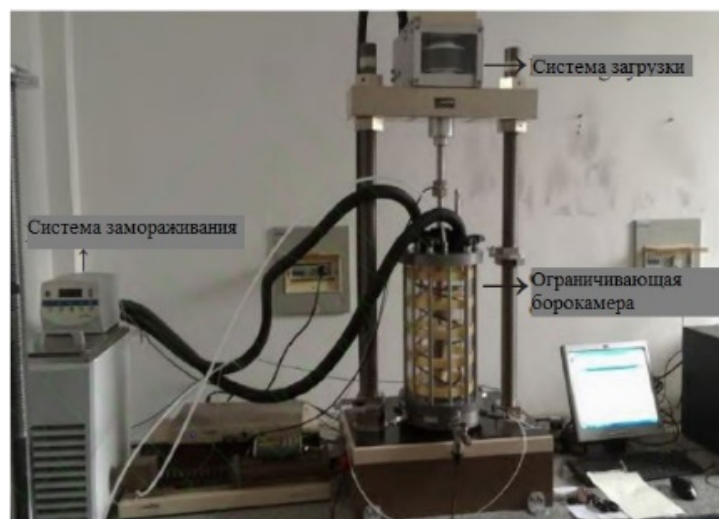


Рис. 4. Динамическая трехосная испытательная установка по J. Wang [17]

Fig. 4. Dynamic triaxial test apparatus to J. Wang [17]

Методика экспериментальных исследований и материалы

Часто с целью уменьшения деформаций сезоннопромерзающих грунтов используют в основаниях малозаглубленных фундаментов распределительные подушки из песка и других сыпучих материалов, которые не изменяют своего объема при промерзании и оттаивании. Однако в ряде случаев при возведении фундамента в зимних условиях песок при отрицательной температуре довольно трудно довести до требуемой плотности, это приведет к тому, что при оттаивании песок окажется в рыхлом состоянии. Рыхлый песок при таянии льда быстро уплотняется, что приводит к просадкам [18]. По борьбе с морозным пучением грунтов существует ряд методов, однако среди них нет универсальных мероприятий, направленных на предотвращение или снижение влияния от сил морозного пучения на конструкции фундаментов зданий и сооружений. Гидромелиорация и цементация грунтов являются эффективными способами, позволяющими практически полностью исключить морозное пучение грунтов, однако они достаточно дорогостоящи по сравнению с другими мероприятиями, вследствие чего не получили широкого применения на текущий момент. Физико-химические мероприятия сложны в производстве и имеют большое количество недостатков при устройстве оснований фундаментов зданий и сооружений капитального строительства, однако данные недостатки не критичны для устройства оснований фундаментов временных хозяйственно-бытовых сооружений [19].

На данный момент в строительстве активно применяется армирование оснований с целью улучшения механических характеристик грунтов. В качестве армирования исполь-

зуют геосинтетические материалы. Это тонкие, гибкие, синтетические листовые материалы, которые улучшают строительные свойства грунтов. Вопросами армирования грунтов занимается ряд ученых как в России, так и за рубежом – A.V. Obsharova, A.B. Мащенко, A.B. Пономарев, A. Guharay, Z. Yang, M. Ghazavi, P. He [20–25]. Экспериментально доказано, что геосинтетики увеличивают несущую способность грунта, увеличивают модуль деформации армированного основания, снижают осадки грунта [26]. Экспериментальные исследования по уменьшению деформаций морозного пучения, армированных тканым геотекстилем, описаны в работах A.B. Мащенко, A.B. Пономарев [27; 28]. В результате исследований выявлено, что армирование тканым геотекстилем снижает деформации пучения глинистых грунтов до 25 %.

Еще одним из способов улучшения свойств грунтов является смешивание грунта с другими материалами, такими как зола-уноса, известь, полимерные волокна, цемент, кремнезем, резиновые частицы, стальные волокна. Исследования A. Correia, Y. Wang, И.А. Чернышева [29–31] показывают, что стальные волокна, зола-уноса, сизалевое волокно положительно влияют на характеристики грунтов, в том числе при промерзании и оттаивании. Однако в работах S. Paul [32] показано, что химические реакции, возникающие при введении в слой грунта таких материалов, как цемент и кремнезем, могут вызывать необратимые изменения в свойствах грунта, тем самым ограничивая сферу применения этих методов улучшения грунтов. А содержание резиновых частиц отрицательно влияет на пучение грунта, что отображено в работах L. Chen [33]. В работе A.V. Obsharova, A.B. Мащенко [20; 34] отмечено увеличение морозного пучения при смешивании глинистых грунтов с фиброволокном. К сожалению, в России исследования по влиянию армирования геосинтетическими материалами на сезоннопромерзающие грунты проводятся в малом количестве, такие эксперименты активно проводятся китайскими, американскими и другими зарубежными учеными. В данном исследовании предлагается рассмотреть некоторые экспериментальные данные по анализу грунтов с использованием различных геосинтетических материалов.

Геосетки. Характеристики армированного грунта зависят от многих параметров, таких как свойства геосинтетика, цикл замораживания – оттаивания, время нагрузки, всестороннее давление, частота и амплитуда деформации сдвига. Z. Yang и др. [18] было изучено влияние геосеток на динамические характеристики песка методом динамического трехосного испытания, и результат показывает, что модуль сдвига армированного песка уменьшается при низком ограничивающем давлении (<100 кПа) и увеличивается при высоком ограничивающем давлении. При трехосных испытаниях песка с геотекстилем динамический модуль увеличивается при циклах замораживания – оттаивания с возрастанием давления и количества слоев геотекстиля. При армировании грунта геосетками может увеличиться динамический модуль сдвига грунта и снизиться эффект повреждения конструкции, вызванный морозным пучением. Динамический модуль сдвига неармированных и прочность армированных образцов увеличивается после первого цикла замораживания – оттаивания и уменьшается после второго цикла замораживания – оттаивания. Такие результаты отражены и в работах Z. Yang, J. Zhang и др. [29; 35; 36].

Влагоотводящий геотекстиль. Геотекстиль предлагает многочисленные преимущества в улучшении эксплуатационных характеристик дорожного покрытия, в том числе дренаж, барьерная функциональность, фильтрация и армирование. В работах Q. Deng, N. Biswas, T. Tang [37–39] рассмотрен новый вариант геотекстиля – влагоотводящий гео-

текстиль, который обладает внутренней способностью автономно отводить воду из грунта. Такой геотекстиль учитывает влияние различной динамики окружающей среды, включая влияние метеорологических факторов, уровень грунтовых вод, повышение температуры грунта и дренаж системы дорожного покрытия. Результаты моделирования показали, что впитывающий геотекстиль создает зону всасывания вокруг места установки для забора воды из окружающих грунтов, тем самым уменьшая общее содержание незамерзшей воды в дорожном покрытии. Результаты также показали, что установка впитывающего геотекстиля задерживает начало морозного пучения и уменьшает его величину. Однако по результатам моделирования Н. Liu, Y. Jiang и др. [40; 41] интересно отметить, что геотекстиль оказывает незначительное влияние на глубину промерзания. Впитывающий геотекстиль практически не влияет на распределение глубины промерзания в дорожном покрытии и грунте, хотя удаляет грунтовую воду из подстилающего слоя (рис. 5) и снижает теплоемкость и теплопроводность грунта. В результате скорость промерзания грунта не сильно меняется, а глубина промерзания не оказывает существенного влияния. Это может быть связано с более низкой теплопроводностью, вызванной заменой воды воздухом в грунте.

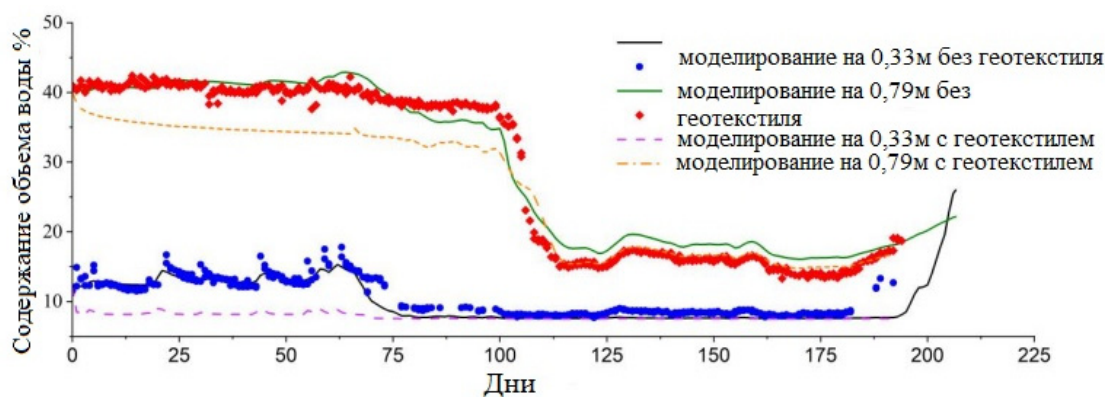


Рис. 5. Содержание объема воды в зависимости от времени на глубине 0,33 и 0,79 м с геотекстилем и без него по Y. Jiang [39]

Fig. 5. Water content vs. time at 0.33 and 0.97 m depth, with and without geotextile to Y. Jiang [39]

Георешетки. D.H. Timm, M. Huang и др. [42; 43] отметили благоприятное применение георешеток в песчаных грунтах при строительстве дорожных оснований. Песчаные основания, армированные георешетками, медленнее промерзают и менее подвержены морозному пучению, также улучшаются механические характеристики грунта. Морозное пучение песчаных грунтов в основании дорожных полотен может быть вызвано водонасыщением грунта из-за грунтовых вод или инфильтрации осадков через поверхность дорожного покрытия или при таянии снега. При изучении данного вопроса рядом ученых M. Huang, и др. [43; 44] были проведены эксперименты с мелкозернистыми песчаными грунтами с 5%-ным содержанием глинистых частиц. Плотность сухого грунта составила $1,97 \text{ г/см}^3$, оптимальная влажность – 11,7 %. В качестве армирования использовались геоячейки из перфорированных ребер толщиной 1,1 мм и высотой 150 мм. После разворачивания каждая ячейка имеет размер отверстия $245 \times 210 \text{ мм}$ (рис. 6).

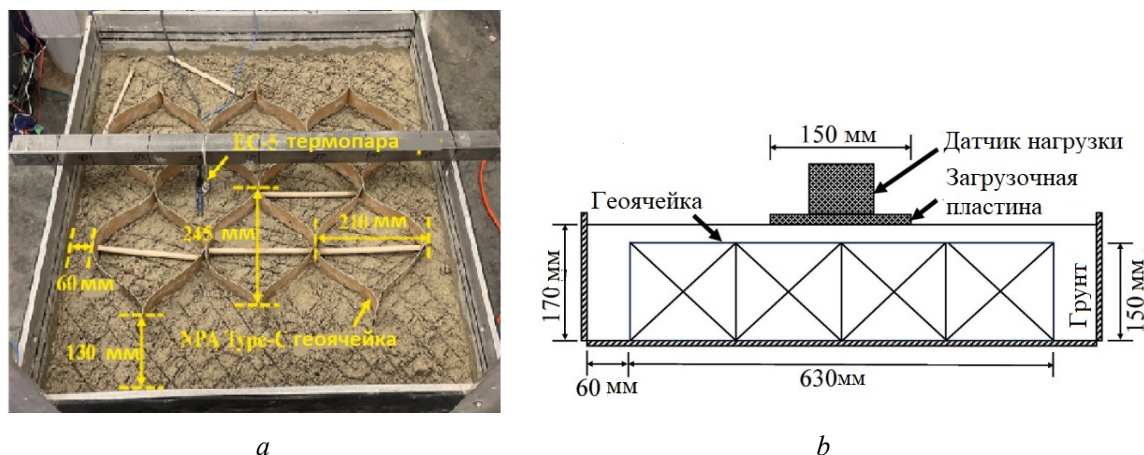


Рис. 6. Расположение геоячеек: вид сверху (a) и вертикальный разрез (b) по М. Huang [43]

Fig. 6. Layout of geocells: plan view (a) and vertical cross-section view (b) to M. Huang [43]

Замораживание и оттаивание оснований достигались путем нагрева и охлаждения слоев основания на поверхности с помощью охлаждающей пластины. После завершения уплотнения основания были накрыты пластиковым листом, и это состояние сохранялось в течение 8 ч для обеспечения гидравлического равновесия. Далее были проведены испытания замораживания – оттаивания. Во время процесса замораживания температура на поверхности оснований была установлена $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью охлаждающей пластины, лежащей на ней. Процесс замораживания был завершен, когда на дне контейнера температура достигла $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оттаивание начиналось с повышения температуры охлаждающей пластины до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оно прекращалось, когда температура дна контейнера достигала $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, завершая тем самым один цикл замораживания – оттаивания [44]. После завершения циклов замораживания – оттаивания был проведен статический тест на нагрузку пластины. По результатам испытаний можно оценить эффективность георешеток. При армировании уменьшение морозного пучения и оттаивания варьируется в зависимости от степени уплотнения. Наибольший эффект достигается в хорошо уплотненных основаниях, чем в слабо уплотненных. Это указывало на то, что процессы замораживания – оттаивания уплотняют рыхлые основания, но ослабляют плотные. Однако с увеличением циклов, такое преимущество ослабляется для хорошо уплотненных оснований. Механические свойства (т.е. жесткость и предельная несущая способность) были снижены после циклов замораживания – оттаивания. С точки зрения механических свойств плохо уплотненные основания пострадали меньше, чем хорошо уплотненные основания при больших циклах промораживания – оттаивания [45].

Композитная геомембрана. Армированием грунтов композитной геомембраной занимались Н. Jiang, R. Bai, H. Zhai и др. [46–48]. Двухслойная композитная геомембрана, обычно производится в обрабатывающей промышленности, в основном используется для предотвращения просачивания воды в гидротехнике. Она состоит из полиэтиленовой геомембраны и нетканого геотекстиля с массой на единицу площади 400 г . Нетканый геотекстиль изготовлен из полиэфирных волокон, а толщина геомембраны составляет $0,3\text{ мм}$ (рис. 7).

Эта композитная геомембрана показывает прочность на разрыв примерно $7,5\text{ кН/м}$ и удлинение при разрыве около $60\text{ }\%$. В модельном эксперименте Н. Jiang [49] были подготовлены илистые грунты с содержанием глины – $10,4\text{ }\%$. Плотность сухого грунта составила $1,73\text{ г/см}^3$, влажность – $18\text{ }\%$. Было создано 2 модели канала (рис. 8).



Рис. 7. Двухслойная композитная геомембрана по Н. Jiang [49]

Fig. 7. Two-layer composite geomembrane to H. Jiang [49]



Рис. 8. Модель канала после строительства облицовки по Н. Jiang [44]

Fig. 8. Canal model after the lining construction to H. Jiang [44]

Каждая модель имела размеры 140 см в длину, 110 см в высоту и 30 см в ширину. В первом варианте была установлена геомембрана между облицовкой канала и грунтом основания, толщина геомембраны составляла 0,6 мм. Второй вариант был без армирования. На основании предварительных испытаний, предшествовавших этому эксперименту, было определено, что глубина промерзания канала составляла примерно 18 см; это примерно 1/10 по сравнению с тем, что наблюдается в реальных условиях. Облицовка канала была выполнена с использованием цементного раствора, состоящего из одной части цемента, двух частей песка и 0,5 части воды. Температуры заморозания и оттаивания были выбраны как $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно, при этом температура алюминиевой пластины на дне канала поддерживалась на уровне $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Явление морозного пучения в грунте основания канала представляет собой динамический процесс, включающий сложное взаимодействие воды, тепла и деформации. Скорость заморозания канала следует порядку: дно < уклон < верх, что приводит к соответствующему количеству миграции воды: низ > уклон > верх, тем самым вызывая морозное пучение канала, как: низ > уклон > вершина. Геомембрана увеличивает относительную тангенциальную деформацию между облицовкой канала и грунтом фундамента, что приводит к сокращению на 35 % при неравномерном морозном пучении. Кроме того, это смягчает деформации сжатия на 29 % и деформации растяжения на 28 % в оболочке. В процессе оттаивания геомембрана может быстро уменьшить морозное пучение, деформации и относительные тангенциальные де-

формации, а также остаточные деформации. Таким образом, геомембрана обладает выраженной противообledenительной способностью.

Геотекстиль, геомембрана. Также Н. Zhai, Р. Не и др. [50; 25] активно проводят исследования влияния циклов замораживания – оттаивания на прочностные характеристики армированных грунтов. В работах Р. Не [25] описан ряд испытаний при взаимодействии песчаного илистого грунта с коротковолокнистым, длиноволокнистым геотекстилем и геомембраной. Сцепление песка составляет 15,9 кПа, угол внутреннего трения $35,4^\circ$. Оба геотекстиля изготовлены из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Коротковолокнистый геотекстиль толщиной 2 мм имеет шероховатую поверхность с относительно высокой твердостью, а длиноволокнистый геотекстиль толщиной 3 мм более мягкий и склонен к образованию складок. Длина волокон двух геотекстилей также различается, коротковолокнистый имеет короткие и изогнутые волокна, а длиноволокнистый содержит беспорядочно переплетенные волокна. Геомембрана изготовлена из полиэтиленового (ПЭ) материала, имеет гладкую и ровную поверхность толщиной 5 мм.

Устройство для испытания на сдвиг было расположено внутри камеры с постоянной температурой (рис. 9). Низкотемпературная комната размером $5,0 \times 2,8 \times 2,8$ м (длина $\times$ ширина $\times$ высота) была сооружена со стенами из полиуретановых изоляционных плит толщиной 150 мм. Система охлаждения включает в себя систему вентиляции и систему контроля температуры, включающую воздухоохладитель, компрессорный блок и микрокомпьютерный контроллер температуры с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Камера с постоянной температурой размерами $2,0 \times 1,2 \times 1,8$ м (длина $\times$ ширина $\times$ высота) была кондиционирована с использованием конденсаторного блока с переменной частотой постоянного тока мощностью от 1 до 3,5 л.с., что позволило достичь точности регулирования температуры $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Цифровой аппарат для испытания на сдвиг оснащен микропроцессором и панелью управления, что позволяет быстро перемещаться вперед и назад в исходное положение, а также измерять горизонтальную нагрузку и смещение. Коробка для испытания на сдвиг имеет размеры $100 \times 100 \times 50$ мм и состоит из двух половин. Максимальное смещение сдвига составляет 12 мм, а максимальное усилие сдвига – 10 кН.

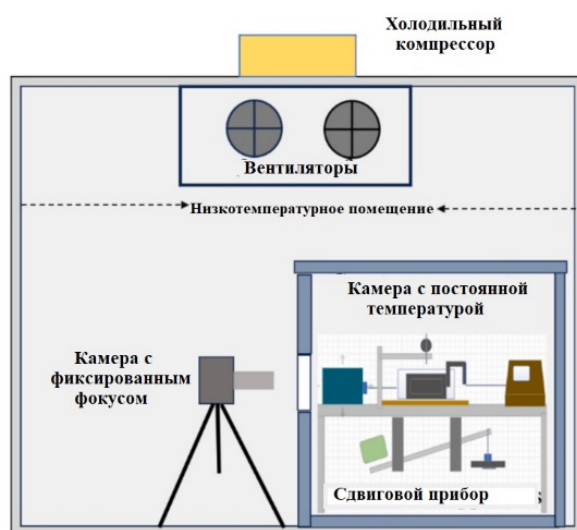


Рис. 9. Сдвиговой прибор внутри камеры постоянной температуры по Р. Не [25]

Fig. 9. Direct shear device inside a constant-temperature chamber to P. He [25]

При испытании нормальные напряжения составили 25; 50; 75; и 100 кПа; влажность грунта 7, 9 и 11 %; температуры испытаний 20; – 2; – 4; – 6; и – 10 °С. Скорость испытания на прямой сдвиг была определена как 0,8 мм/мин.

По результатам испытаний Р. Не [25] пиковая прочность на сдвиг на контакте песка и геомембраны существенно увеличивается при понижении температуры и повышении содержания воды. Однако пиковые значения прочности на сдвиг на контакте песка и коротковолокнистого и длиноволокнистого геотекстилей показывают заметное увеличение только при – 10 °С. Такое поведение происходит из-за того, что волокнистый слой на поверхности геотекстиля поглощает часть воды из грунта, уменьшая поверхностные кристаллы льда и влияя на пиковую прочность на сдвиг на контакте (рис. 10). Гладкая и непроницаемая поверхность геомембраны, наоборот, позволяет кристаллам льда образовываться более легко по мере понижения температуры и увеличения содержания воды, что приводит к значительному изменению прочности на сдвиг на контакте с песком. При сравнении замороженных и незамерзших состояний наблюдается заметное изменение прочности на сдвиг на контакте «песок – геомембрана». Это объясняется гладкими свойствами поверхности мембраны. В незамерзшем состоянии частицы песка на границе сжимаются, а вода действует как смазка. Однако в условиях замерзания песок смерзается, что усиливает межфазную связь и, таким образом, увеличивает межфазную прочность на сдвиг. Прочность на сдвиг на контакте с песчаным грунтом и геотекстилем зависит от типа геотекстиля, его водопоглощающей способности и механических свойств. В условиях высокого содержания воды длиноволокнистый текстиль поглощает воду, мигрирующую к границе раздела во время фазы быстрого замерзания. Остаточная прочность на сдвиг на границах контакта «песок – коротковолокнистый текстиль» и «песок – длиноволокнистый текстиль» практически не зависит от изменений температуры и влажности, тогда как остаточная прочность на сдвиг на границе контакта «песок – геомембрана» постепенно увеличивается с понижением температуры.

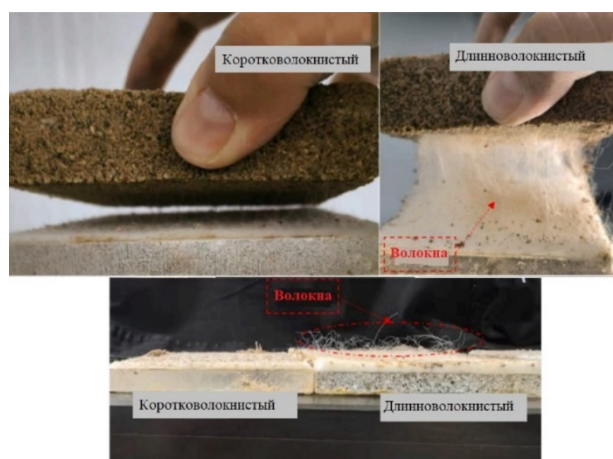


Рис. 10. Взаимодействие песка с геотекстилями после сдвига по Р. Не [25]

Fig. 10. Interface display of sand and three geosynthetics after shearing to P. He [25]

Данные Х. Wan и др. [51] показывают, что углы трения на границе контакта песка и геотекстиля больше или равны углу трения песка. На контакте с мембраной они меньше, чем у песка при оттаивании, но превышают их при замерзании. Контакты песка с геотекстилями покрыты значительным количеством мягких волокон. При содержании воды 7 %

сцепление остается относительно стабильным при понижении температуры, при этом геотекстиль демонстрирует более высокое сцепление, чем геомембрана. Однако при содержании воды 9 и 11 % сцепление постепенно увеличивается с понижением температуры. Сцепление на контакте с геомембраной относительно слабее, чем на границах с геотекстилем. Прочность на сдвиг на этих границах в первую очередь обеспечивается эффектами трения.

Стальные волокна. Исследования A. Correia, Y. Wang, R.J. Shi, J. Zhou и др. [29; 51–53] показали, что включение небольшого количества стальных волокон может значительно изменить природу грунтов и улучшить ее механические и пучинистые свойства. Изменения параметров теплофизических и механических свойств могут повлиять на миграцию воды и процесс выщелачивания льда, что влияет на защитную деформацию при замерзании. В ходе испытаний, проводимых R.J. Shi [51], были выбраны глинистые грунты с илом. Выбранные стальные волокна представляли собой обычные прямые стальные волокна с медным покрытием длиной 8, 10, 13 мм, диаметром 0,12, 0,2, 0,3 мм. Волокна добавляли в грунт в процентном соотношении 0,25; 0,5; 0,75 %. После испытания образцы с различным содержанием стальных волокон показаны на рис. 11, содержание влаги измеряется на 10-миллиметровых срезах вдоль направления высоты.

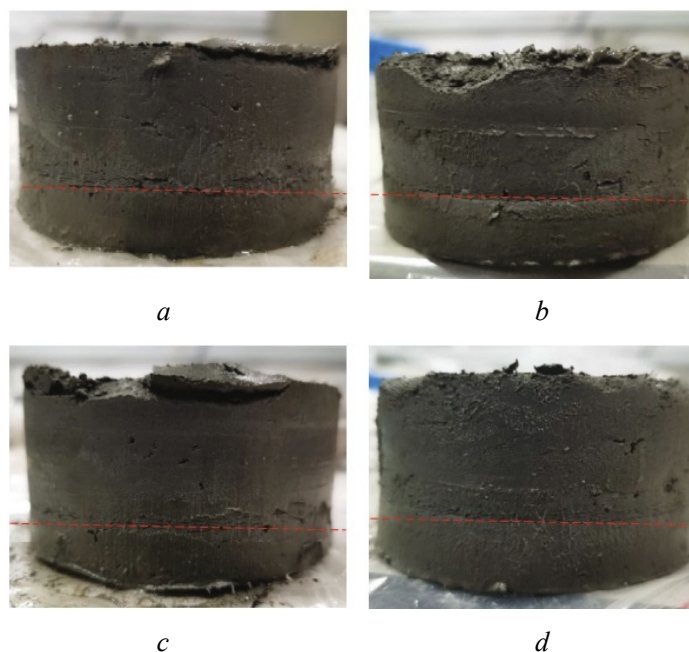


Рис. 11. Образцы мерзлого грунта со стальными волокнами по R. Shi [51]:
0 % (a); 0,25 % (b); 0,5 % (c); 0,75 % (d)

Fig. 11. Frozen soil samples at the end of freezing to R. Shi [51]:
c = 0 (a); c = 0,25 % (b); c = 0,5 % (c); c = 0,75 % (d)

Из данных рис. 11 видно, что после замерзания в верхней части нет явного слоя конденсации льда, но в нижней части образца образуется линза льда. Положения линз льда, образованных в условиях различного содержания стальных волокон, в основном одинаковы, что проявляется в виде явных трещин в нижней части образца. Замерзание воды в грунте заполняет промежутки между частицами и блокирует проход миграции воды, поэтому миграция будет проявляться только в незамерзшей области образца, а замерзшая часть не будет продолжать пополнять воду извне [51]. Добавление небольшого количества

стального волокна не оказывает существенного влияния на процесс замораживания и характеристики распределения внутренней температуры. После 90 мин замораживания большой градиент температуры в нижней части образца вызывает миграцию внешней влаги, что приводит к быстрому росту деформации морозного пучения. Стальное волокно может улучшить прочность на разрыв мерзлого грунта, подавить рост ледяных линз и уменьшить количество миграции воды, тем самым уменьшая морозное пучение. Скорость морозного пучения снизилась на 26,93 % при включении 0,5 % стального волокна. Когда количество стальных волокон, добавленных к образцам грунта, увеличивалось с 0,25 до 0,75 % или длина стальных волокон увеличивалась с 8 до 13 мм, эффект ингибирования морозного пучения увеличился на 10,44 и 12,45 % соответственно. Напротив, когда диаметр стальных волокон увеличивался с 0,12 до 0,3 мм, эффект ингибирования морозного пучения уменьшался на 10,77 %. При содержании стального волокна 0,75 % скорость пучения илестой глины снижается на 14,31 %, а миграция воды на 11,99 % [49].

Сизалевое волокно. Еще один материал, внедряемый в грунт, для улучшения его свойств – это сизалевое волокно. Сизаль – натуральный материал из листьев агавы (*Agava Sisolana*), произрастает в странах Центральной и Южной Америки и напоминает большой куст алоэ (рис. 12). Волокно агавы очень жесткое и крепкое на износ, практически не боится влаги и слабо подвержен гниению.



Рис. 12. Сизалевое волокно

Fig. 12. Sisal fiber

В своих работах R. Shi [54] отмечает, что добавление натуральных волокон не только заменяет некоторые энергоемкие заполнители, но и снижает выбросы углерода во время подготовки и использования образцов. Кроме того, это смягчает образование и расширение трещин, повышает прочность на сжатие и растяжение и увеличивает устойчивость к эрозии. Использование волокна сизаля для армирования глинистых грунтов в суровых условиях окружающей среды показало, что волокна сизаля эффективно подавляют развитие трещин. Это экологически чистый и положительный метод улучшения состояния грунтов в сложных условиях. Были проведены многочисленные эксперименты для оценки эффекта армирования грунта натуральными волокнами: прочность грунтов, армированных натуральными волокнами, экспоненциально снижалась по мере увеличения количества циклов промерзания и оттаивания.

Грунты, армированные сизалем, демонстрируют значительное улучшение прочности и пластичности по сравнению с другими синтетическими армированными волокнами грунтами, испытанными в тех же условиях. J. Lu, Y. Liu, F. Deng и др. [55–57] была иссле-

дована эффективность использования натуральных волокон в качестве армирующих агентов для смягчения растрескивания при растяжении в пучинистых грунтах, подвергнутых воздействию циклов замораживание – оттаивания. Также был исследован механизм расширения грунта, армированного волокнами.

Эксперимент проводился с истыми глинами (содержание ила до 53 %), плотностью сухого грунта $1,6 \text{ г/м}^3$ и влажностью 13,5 %. В качестве армирования использовалось волокно сизаля длиной 1 см. Испытания проводились при смешивании грунта с волокнами на 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 %. Высота образца грунта составила 300 мм, а диаметр 150 мм. Проводилось двенадцать циклов промораживания и оттаивания, каждый цикл длился 40 ч. В течение двенадцати циклов нижняя холодная пластина поддерживалась при постоянной температуре 1°C .

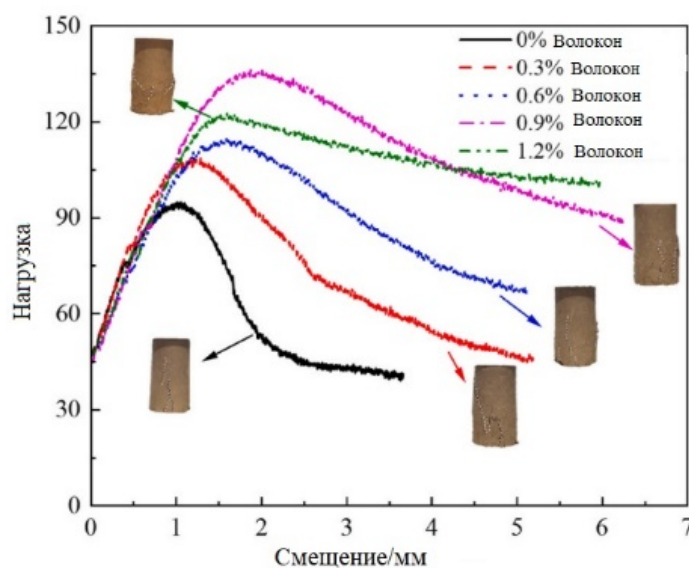


Рис. 13. Кривые зависимости смещения образцов грунта от нагрузки по J. Lu [55]

Fig. 13. Load-displacement curves of soil samples to J. Lu [55]

На рис. 13 показаны кривые нагрузки и смещения образцов грунта. Прочность на сжатие образцов грунта изначально увеличивалась, а затем уменьшалась с включением волокон сизаля. Это может быть связано с образованием трехмерной сети волокон внутри грунта, увеличивая способность грунта выдерживать внешнее давление. Между тем увеличение доли содержания волокон сизаля увеличивает сопротивление трения и силы взаимодействия между частицами грунта.

Более того, волокна сизаля препятствовали развитию трещин в образцах. Когда в образцах грунта образовывались трещины, эти волокна могли выдерживать растягивающее напряжение. Это, в свою очередь, эффективно препятствовало расширению трещин. Согласно результатам механических испытаний, предварительные выводы показали, что оптимальная дозировка волокон сизаля, добавленных в грунт, составляла 0,9 %.

J. Lu и Y. Liu [55; 56] в своих работах отмечает, что скорость вспучивания при замерзании образца грунта, армированного сизалевым волокном, ниже, чем у образцов грунта без сизалевого волокна. Это связано с тем, что добавление сизалевого волокна усилило сцепление и трение грунтов и, таким образом, ограничило движение частиц грунта. Кроме того, скорость осадки при оттаивании образца грунта, армированного сизалевым волокном, ниже по сравнению с неармированным грунтом. Это может быть связано с тем, что

добавление сизалевых волокон повысило прочность образца грунта. Сизалевое волокно может обеспечить уровень поддержки во время процесса оттаивания, одновременно ограничивая движение частиц грунта.

Обсуждение и выводы

Анализ обзора российской и зарубежной литературы показал, что изучение свойств сезоннопромерзающих грунтов остается актуальной задачей. Морозное пучение грунтов является сложным процессом, зависящим от многих факторов: вида грунта, его физических и механических характеристик, температуры окружающего воздуха, скорости промерзания и миграции влаги в грунте к фронту промерзания, уровня расположения подземных вод от дневной поверхности, величины внешней нагрузки, действующей на грунт, и других. Помимо морозного пучения, на грунты негативно влияет циклическое замораживание – оттаивание. Такие циклы оказывают влияние на пористость грунтов: для плотных грунтов этот показатель возрастает, а для рыхлых уменьшается. Проницаемость грунта увеличивается при оттаивании и зависит от числа циклов замораживания – оттаивания. Данный рост проницаемости связан с образованием новых микротрещин при замораживании и больших пор при таянии льда, что отмечено и в работах А.А. Кузнецова и др. [58; 59]. Как показывают зарубежные исследования, внедрение в грунт геосинтетических материалов в целом положительно влияет на прочностные, динамические, деформационные характеристики грунтов, а также на деформации морозного пучения, что соотносится с исследованиями российских ученых. В итоге можно сделать следующие выводы:

1. Армирование песка геотекстилем позволяет повысить динамически модуль деформации. Модуль увеличивается при циклах замораживания – оттаивания и с увеличением армирующих прослоек.
2. Углы внутреннего трения на границе контакта песка и геотекстиля больше или равны углу трения песка. Это зависит от величины ворса геотекстиля. Пиковая прочность на сдвиг увеличивается при температуре ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сцепление повышается с увеличением влажности.
3. Влагоотводящий геотекстиль удаляет воду из подстилающих слоев, снижает теплоемкость и теплопроводность грунта, задерживает процесс морозного пучения и уменьшает его величину.
4. Геомембрана увеличивает пиковую прочность на сдвиг песка при понижении температуры из-за гладкой и непроницаемой поверхности, которая позволяет кристаллам льда образовываться более легко по мере понижения температуры и увеличении содержания воды. Также увеличивается остаточная прочность на сдвиг.
5. Угол внутреннего трения песка на контакте с мембраной слабее, но увеличивается при замерзании.
6. При армировании песков геосетками увеличивается динамический модуль сдвига, что может снизить эффект повреждения конструкции, вызванный морозным пучением.
7. Георешетки уменьшают морозное пучение и оттаивание в зависимости от уплотнения песчаных грунтов. Наибольший эффект достигается в хорошо уплотненных основаниях. Однако с увеличением циклов замораживания – оттаивания, такое преимущество переходит к рыхлым пескам.
8. Армирование глинистых грунтов тканым геотекстилем уменьшает деформации пучения до 25 %, за счет снижения миграции влаги в образце.

9. Стальное волокно улучшает прочность на разрыв мерзлого грунта, подавляет рост ледяных линз и уменьшает количество миграции воды, уменьшая морозное пучение.

10. Оптимальное содержание стального волокна в глинистых грунтах составляет 0,75 %, размер стального волокна – 0,12 мм в диаметре, 8 мм в длину. При таком соотношении скорость пучения уменьшается на 14 %, а миграция воды на 12 %.

11. Сизалевое волокно заменяет некоторые энергоемкие заполнители, снижает выбросы углерода во время подготовки и использования образцов, смягчает образование и расширение трещин, повышает прочность на сжатие и растяжение и увеличивает устойчивость к эрозии.

12. Оптимальное содержание волокон в грунте составляет 0,9 %, что позволяет значительно снизить скорость пучения и осадки при оттаивании.

В настоящее время геосинтетические материалы широко используются в слабых грунтах при заложении фундаментов мелкого заложения, строительстве железных дорог и автомагистралей, при армировании подпорных стенок и крутых откосов. Однако применение их в качестве противопучинистых материалов сведено к минимуму. В зарубежных странах активнее применяются армированные конструкции в сезоннопромерзающих грунтах при строительстве автомобильных и железных дорог. Одним из примеров является строительство завода Cargill в провинции Саскачеван (Канада) на промерзающих пучинистых глинистых грунтах (глубина до 10,3 м). Этот пример описан в работе R. Laprade и др [60] (рис. 14). Было рассмотрено три варианта подготовки площадки для поддерживаемых грунтом конструкций на грунтах, подверженных морозному пучению: 1. Замена существующего природного мягкопластичного глинистого грунта на низкопластичную импортную глинистую засыпку. 2. Стабилизация грунта цементацией. 3. Контроль влажности и армирование грунтового полотна геотекстилем и георешеткой. Вариант 1 был отклонен, поскольку он привел бы к самым высоким затратам на строительство, а также к самому длительному периоду строительства. Вариант 2 также был отклонен из-за опасений, что этот подход не будет работать в течение проектного периода, поскольку он ухудшится из-за инфильтрации поверхностных вод, погодного цикла и потенциального химического воздействия на грунты. Был выбран вариант 3.



Рис.14. Завод Cagrill по R. Laprade [60]

Fig. 14. Fabric Cagrill to R. Laprade [60]

Использовались три типа геосинтетиков: тканый геотекстиль, отводящий влагу, обеспечивающий гидравлическую и механическую стабилизацию железнодорожных и автомобильных конструкций, встроенный высокомодульный тканый геотекстиль для усиления балласта и двухосная геосетка для армирования оснований подъездных дорог. Интегрированный высокомодульный тканый геотекстиль также использовался в плацдармах и гравийных покрытиях для уменьшения количества требуемого гранулированного основного материала. Как нестабилизированные, так и геосинтетические стабилизированные рельсовые конструкции оценивались с использованием уравнения Тальбота в соответствии с методологией, изложенной в руководстве AREMA по железнодорожному проектированию [61]. В качестве проверки конструкции подбалласт оценивался как временная подъездная дорога для строительных работ с использованием метода, описанного J.P. Giroud, Han Jie [62].

Неармированная рельсовая конструкция требовала 229 мм балласта и 915 мм подбалласта. Геосинтетическая стабилизированная и армированная рельсовая конструкция сохранила ту же толщину балласта, однако подбалласт был уменьшен до 305 мм. Это 55%-ное уменьшение толщины обеспечило значительное сокращение времени строительства, гранулированного материала и расходов на перевозку. Геосинтетическая стабилизированная секция обеспечила 20 % общей экономии затрат по сравнению с неармированной рельсовой конструкцией. Данный практический пример предлагает ценную информацию о геосинтетических решениях в стабилизации дорог и оптимизации железнодорожного балласта по сравнению с морозоустойчивыми глинами.

Использование геосинтетических армирующих материалов для улучшения свойств сезоннопромерзающих грунтов является перспективным направлением, требующим дальнейшего изучения. Необходимо, продолжать исследования влияния армирования геосинтетическими материалами грунтов, подверженных процессам промораживания и оттаивания. Более глубокие результаты исследований предоставят новые исследовательские идеи и методы для решения различных проблем в регионах, подверженных сезонному промерзанию и оттаиванию грунтов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Пермикин, А.С. Анализ напряженно-деформированного состояния фундаментов дорожно-транспортных сооружений на сезоннопромерзающих грунтах / А.С. Пермикин, И.Г. Овчинников, А.И. Грицук // Транспортные сооружения. – 2020. – Т. 7, № 4. – С. 1.
2. Dong, S. Analyses of the impacts of climate change and forest fire on cold region slopes stability by random finite element method / S. Dong, Y. Jiang, X. Yu // Landslides. – 2021. – No1 8. – P. 2531–2545.
3. Результаты экспериментального исследования сезоннопромерзающего пучинистого основания / Жайсамбаев Е.А., Скворцов Д.С., Краев А.Н., Паренкина О.А. // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – №3.
4. Experimental study and numerical modeling of the thermohydro-mechanical processes in soil freezing with different frost penetration directions / A.H. Sweida, K. Niggemann, Y. Heider, M. Ziegler, B. Markert // Acta Geotech. – 2022. – No 17. – P. 231

5. Din, I.M. Effect of freeze-thaw cycles on the properties of asphalt pavements in cold regions: a review / I.M. Din, M.S. Mir, M.A. Farooq // *Transp. Res. Procedia*. – 2020. – No 48. – P. 3634–3641.
6. Effects of freeze-thaw on soil properties and water erosion / B. Sun, F. Ren, W. Ding, G. Zhang, J. Huang, J. Li, L. Zhang // *Soil and Water Research*. – 2021. – No. 16 (4). – P. 205–216. DOI: 10.17221/143/2020-SWR
7. Wang, L. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region / L. Wang, X. Zuo, F. Zheng // *Catena*. – 2020. – No. 193. – P. 104615.
8. Effects of freezethaw on soil detachment capacity and erosion resistance / B.Y. Sun, Z.G. Wu, Z.B. Li, J. Liu // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* – 2020. – No 36. – P. 57–65.
9. Jie, Z. Experimental inference on dualporosity aggravation of soft clay after freeze-thaw by fractal and probability analysis / Z. Jie, Y. Tang // *Cold Regions Science & Technology*. – 2018. – No. 153. – P. 181–196.
10. Influence of plasticity on unfrozen water content of frozen soils as determined by nuclear magnetic resonance / L.M. Kong, Y.S. Wang, W.J. Sun, J.L. Qi // *Cold Reg. Sci. Technol.* – 2020. – No 172. – 102993. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.102993
11. Freeze-thaw performance of a cementtreated expansive soil / Y. Lu, S.H. Liu, Y.G. Zhang, Z. Li, L. Xu // *Cold Reg. Sci. Technol.* – 2020. – No. 170. – 102926. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102926
12. Experimental study on frost heaving behavior of soil under different loading paths / L. Huang, Y. Sheng, J.C. Wu, B.B. He, X.B. Huang, X.Y. Zhang // *Cold Reg. Sci. Technol.* – 2020. – No 169. – 102905. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102905
13. Li, T. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze-thaw cycles with loads / T. Li, L. Kong // *Cold Regions Science and Technology* – 2021. – No. 193. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103393
14. Effect of freeze-thaw cycles on the physical and dynamic characteristic of modified Na-bentonite by KCl / Yang Z., Cui Y., Li G. et al / *Arabian Journal of Geosciences* – 2020. – Vol. 13. – No. 23. – P. 1–15.
15. Dynamic behavior of geosynthetic-reinforced expansive soil under freeze-thaw cycles / Z. Yang, X. Liu, L. Zhang, F. Niu, X. Ling // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – P. 11.
16. Liu, T. Experimental research on the development of residual strain in seasonal frozen soil under freezing-thawing and impact type traffic loads / T. Li, M. Wang // *Earthquake engineering and engineering vibration* – 2021. – Vol. 20 – No. 2 – P. 335–345. DOI: 10.1007/s11803-021-2001-3.
17. Wang, J. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices / J. Wang, H. Liu // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. – 2014. – No. 36(4). – P. 633–639.
18. Карлов, В.Д. Основания и фундаменты на сезоннопромерзающих пучинистых грунтах: монография. / В.Д. Карлов. – М.: СПб.: Издательство Санкт-Петербургский гос. архитектурно-строительный университет, 2007. – 350 с.
19. Способы борьбы с морозным пучением сезоннопромерзающих грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений / Д.С. Скворцов, А.Н. Краев, А.Н. Краев, Е.А. Жайсамбаев // *Вестник Евразийской науки*. – 2020. – №5. – Т. 11.

20. Obsharova, A.V. Effect of the fiber reinforcement on the mechanical properties of clay soils, including properties under conditions of seasonal freezing and thawing / A.V. Obsharova, A.S. Grishina // *Journal of physics: conference series*. – 2021. – Vol. 1928. – P. 012067
21. Мащенко, А.В. Анализ изменения прочностных и деформационных свойств грунта, армированного геосинтетическими материалами при разной степени водонасыщения / А.В. Мащенко, А.Б. Пономарев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2014. – № 4. – С. 264–273.
22. Guharay, A. Effect of natural fiber reinforcement on strength response of alkali activated binder treated expansive soil: experimental investigation and reliability analysis / A. Guharay, S. Mazhar // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 273.
23. Advances in properties of rubber reinforced soil / Z. Yang, Q. Zhang, W. Shi, J. Lv, Z. Lu, X. Ling // *Advances in Civil Engineering*. – 2020. – No.10. – P. 16.
24. Ghazavi, M. Laboratory Investigation on Thermal Conductivity of Geotextile- Reinforced Soils / M. Ghazavi, S. Ghoreshezadeh // *Research square*. – 2024. – P. 25. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3859386/v1
25. The influence of geosynthetic properties on their shear behaviors at the interface with frozen soil / P. He, G. Hou, H. Cao, F. Yue // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2025. – No. 53 – P. 497–509. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.11.011
26. Мащенко, А.В. К вопросу определения деформационных характеристик грунтов в условиях сезонного промерзания и оттаивания / Мащенко А.В. // *Строительство и архитектура*. – 2015. – Т. 3. – № 2. – С. 87–89.
27. Мащенко, А.В. Влияние различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта в условиях сезонного промерзания и оттаивания / А.В. Мащенко, А.Б. Пономарев // *Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: материалы симпозиума* / под ред. А.Л. Исакова и Ц.К. Лю. – 2015. – С. 143–147.
28. Мащенко, А.В. Влияние армирования геосинтетическими материалами на пучинистые свойства грунтов / А.В. Мащенко // *Вестник гражданских инженеров*. – 2015. – № 6 (53). – С. 100–103
29. Correia, A. Strength of a stabilised soil reinforced with steel fibres / A. Correia, P. Oliveira // *Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering*. – 2017. – Vol. 170, no. 4. – P. 312–321.
30. Macro-meso fatigue failure of bimrocks with various block content subjected to multi-stage fatigue triaxial loads / Y. Wang, T. Mao, Y. Xia, X. Li // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 163. – P. 107014.
31. Чернышева, И.А. Сравнение методов защиты от морозного пучения грунта / И.А. Чернышева, А.В. Мащенко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2016. – Т. 7. – № 4. – С. 64–72.
32. Paul, S. Effectiveness of areca fiber and cement on the engineering characteristics of compressed stabilized earth blocks / S. Paul, M.S. Islam, N. Chakma // *Construct. Build. Mater.* – 2024. – No. 427. – 136290.
33. Chen, L. Research on preventing soil frost heave with geotechnical reinforcement / L. Chen, R.P. Guo, G.X. Li // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1996. – Vol. 3. – P. 84–88.
34. Мащенко, А.В. Анализ влияния армирования фиброволокном на свойства глинистых грунтов в условиях сезонного промерзания и оттаивания / А.В. Мащенко, А.Б. Поно-

марев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 44-1 (63). – С. 40–50.

35. Prediction of permanent deformation for subgrade soils under traffic loading in southern China / J. Zhang, J. Peng, A. Zhang, J. Li // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2020. – P. 1–10.

36. Numerical simulation of the moisture migration of unsaturated clay embankments in southern China considering stress state / J. Zhang, F. Li, L. Zeng, J. Peng, J. Li // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2021. – Vol. 80, no. 1. – P 11–24.

37. A freezing-thawing damage characterization method for highway subgrade in seasonally frozen regions based on thermal-hydraulic-mechanical coupling model / Q. Deng, X. Liu, C. Zeng, X. He, F. Chen, S. Zhang // *Sensors*. – 2021. – No. 21. – 6251.

38. Evaluating the performance of wicking geotextile in providing drainage for flexible pavements built over expansive soils / N. Biswas, A.J. Puppala, M.A. Khan, S.S. Congress, A. Banerjee, S. Chakraborty // *Transp. Res. Rec.* – 2021. – No. 2675. – P. 208–221.

39. The effect of horizontal freezing on the characteristics of water migration and matric suction in unsaturated silt / T. Tang, Y. Shen, X. Liu [et al] // *Eng. Geol.* – 2021. – No 288. – 106166.

40. Field monitoring of wicking geotextile to reduce soil moisture under a concrete pavement subjected to precipitations and temperature variations / H. Liu, J. Han, M. Al-Naddaf, R.L. Parsons, J.I. Kakrasul // *Geotext. Geomembr.* – 2022. – No 50. – P. 1004–1019.

41. A Multiphysics Simulation of the Effects of Wicking Geotextile on Mitigating Frost Heave under Cold Region Pavement / Y. Jiang, Z. Alajlan, C. Zapata, X. Yu // *Geosciences*. – 2024. – No. 14. – 34. DOI:10.3390/geosciences14020034

42. Timm, D.H. Design and instrumentation of the structural pavement experiment at the ncat test track / D.H. Timm, A.L. Priest, T.V. McEwen // *National Center for Asphalt Technology (NCAT)*. – 2004. – Report 04-01.

43. Huang, M. Freeze-thaw behavior of geocell-reinforced bases considering different fines contents / M. Huang, C. Lin, S.K. Pokharel // *Geosynth. Int.* – 2023. – No 31(3). – P. 221–238

44. Freeze-thaw impacts on geocell-stabilized bases considering effects of water supply and compaction / M. Huang, K. Sanat, M. Liu, Lin. Cheng // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2025. – No. 53. – P. 81–95. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.09.002

45. Model tests of freeze-thaw behavior of geocell-reinforced soils / M. Huang, C. Lin, S.K. Pokharel, A. Tura, P. Mukhopadhyaya // *Geotext. Geomembranes*. – 2023. – No 49 (3). – P. 669–687

46. A novel two-layer composite geomembrane lining structure to mitigate frost damage in cold-region canals: Model test and numerical simulation / H. Jiang, M. Zhang, Z. Wang, Y. Wang, Z. Wang, X. Sun. // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2025. – No. 53 – P. 510–527. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.11.013

47. Investigation on frost heave of saturated–unsaturated soils / R.Q. Bai, Y.M. Lai, W.S. Pei, M.Y. Zhang // *Acta Geotech.* – 2020. – No. 15. – P. 3295–3306. DOI: 10.1007/s11440-020-00952-6

48. Anti-frost heave design method for a parabolic canal based on the hydraulic optimal solution set in seasonally frozen regions / H.Y. Jiang, L.X. Li, Z.Z. Wang, J.W. Gong, T. Sun, H.X. Li // *Cold Reg. Sci. Technol.* – 2022. – No 193. – 103433. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103433

49. Performance evaluation of nonwoven geotextiles in soil-fabric interaction / H. Zhai, S.B. Mallick, D. Elton, S. Adanur // *Textil. Res. J.* – 1996. – No. 66 (4) – P. 269–276.

50. Mesoscopic shear evolution characteristics of frozen soil-concrete interface / X. Wan, H. Zhou, F. Zhou, J. Zhu, K.M. Shahab // *Cold Reg. Sci. Technol.* – 2024. – 104342
51. Shi, R.J. A Method for Suppressing Frost Heave Deformation of Fiber / R.J. Shi, F. Huang, F.T. Yue // *Improved Ground* – 2021. – No. 5.
52. On the effect of confining pressure on fatigue failure of block-in-matrix soils exposed to multistage cyclic triaxial loads / Y. Wang, Y. Su, Y. Xia, H. Wang // *Fatigue & Fracture Geofluids 13 of Engineering Materials & Structures.* – 2022. – Vol. 45. – No.9. – P. 2481–2498.
53. Zhou, J. Experimental and theoretical characterization of frost heave and ice lenses / J. Zhou, C. Wei, H. Wei // *Cold Regions Science and Technology* – 2014. – Vol. 104–105, no. 3. – P. 76–87.
54. Experimental Study on Frost Heave Behavior of Steel Fiber Improved Soil / R. Shi, F. Huang, F. Yue, Z. Hong // *Hindawi Geofluids.* – 2022. DOI: 10.1155/2022/1601398
55. Mitigating frost heave and enhancing mechanical performance of silty clay with sisal fibre and geopolymer / J. Lu, F. Deng, W. Pei, X. Wan, Z. You, Z. Zhang // *Construct. Build. Mater.* – 2024. – No. 447. – 138120.
56. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling / Y. Liu, Q. Wang, S. Liu, Y. Shang // *Cold Reg. Sci. Technol.* – 2014. – No. 161 – P. 32–42.
57. Mitigating frost heave of a soil stabilized with sisal fiber exposed to freeze-thaw cycles / F. Deng, J. Lu, X. Wan, B. Liu // *Geotextiles and Geomembranes.* – 2025. – No. 53 – P. 394–404. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.10.005
58. Влияние цикла замораживания-оттаивания на физические, механические и деформационные характеристики грунта / А.А. Кузнецов, М.О. Куклина, Е.В. Губанова, И.В. Горшков, И.Н. Парамонов // *Инновационные научные исследования.* – 2021. – №9-2(11) – С. 39–48. DOI:10.5281/zenodo.5529323
59. Кузнецов, А.А. Влияние цикла замораживания-оттаивания на модуль деформации глинистого грунта с различной влажностью / А.А. Кузнецов, М.О. Мугинова, И.Н. Парамонов // *Инновационные научные исследования.* – 2022. – №5-1(19) – С. 66–71. DOI: 10.5281/zenodo.6613609
60. Laprade, R. Geosynthetic solutions for road stabilization and railway ballast optimization over frost susceptible and expansive clays: A case study of the Cargill Canola processing facility / R. Laprade, Nesbit B. // *E3S Web of Conferences.* – 2024. – No. 569. – P. 29004. DOI:10.1051/e3sconf/202456929004
61. AREMA, AREMA Manual for Railway Engineering. – 2022. – Vol. 4.
62. Giroud, J.P. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. i development of design method / J.P. Giroud, J. Han // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* (ASCE 2004). – 2004.

References

1. Permikin A.S., Ovchinnikov I.G., Gricuk A.I. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya fundamentov dorozhno-transportnyh sooruzhenij na sezonnopromerzayushchih gruntah. *Transportnye sooruzheniya*, 2020, T. 7, № 4. S. 1.
2. Dong S., Jiang Y., Yu X. Analyses of the impacts of climate change and forest fire on cold region slopes stability by random finite element method. *Landslides*, 2021, no. 18, pp. 2531–2545.

3. Zhajsambaev E.A. Skvorcov D.S., Kraev A.N. Paryonkina O.A. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya sezonopromerzayushchego puchinistogo osnovaniya. *Vestnik Evrazijskoj nauki*, 2020, vol. 12, no. 3.
4. Sweida A.H., Niggemann K., Heider Y., Ziegler M., Markert B. Experimental study and numerical modeling of the thermohydro-mechanical processes in soil freezing with different frost penetration directions. *Acta Geotech*, 2022, No 17, pp. 231
5. Din I.M., Mir M.S., Farooq M.A. Effect of freeze-thaw cycles on the properties of asphalt pavements in cold regions: a review. *Transp. Res. Procedia*, 2020, No 48, pp. 3634–3641.
6. Sun B., Ren F., Ding W., Zhang G., Huang J., Li J., Zhang L. Effects of freeze-thaw on soil properties and water erosion. *Soil and Water Research*, 2021, No. 16 (4), pp. 205–216. DOI: 10.17221/143/2020-SWR
7. Wang L., Zuo X., Zheng F. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region. *Catena*, 2020, No193: 104615
8. Sun B.Y., Wu Z.G., Li Z.B., Liu J. Effects of freezethaw on soil detachment capacity and erosion resistance. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, No36, pp. 57–65.
9. Jie Z., Tang Y. Experimental inference on dualporosity aggravation of soft clay after freeze-thaw by fractal and probability analysis. *Cold Regions Science & Technology*, 2018, No. 153, pp. 181–196.
10. Kong L.M., Wang Y.S., Sun W.J., Qi J.L. Influence of plasticity on unfrozen water content of frozen soils as determined by nuclear magnetic resonance. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2020, No172, 102993. DOI:10.1016/j.coldregions.2020.102993.
11. Lu Y., Liu S.H., Zhang Y.G., Li Z., Xu L. Freeze-thaw performance of a cementtreated expansive soil. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2020, No.170, 102926. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102926.
12. Huang L., Sheng Y., Wu J.C., He B.B., Huang X.B., Zhang X.Y. Experimental study on frost heaving behavior of soil under different loading paths. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2020, No169, 102905. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102905.
13. Li. T., Kong L. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze–thaw cycles with loads. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, No. 193. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103393.
14. Yang Z., Cui Y., Li G. et al. Effect of freeze-thaw cycles on the physical and dynamic characteristic of modified Na-bentonite by KCl. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, V. 13, No. 23, pp. 1–15.
15. Yang Z., Liu X., Zhang L., Niu F., Ling X. Dynamic Behavior of Geosynthetic-Reinforced Expansive Soil under Freeze-Thaw Cycles. *Advances in Civil Engineering*, 2021, pp. 11.
16. Liu T., Wang M. Experimental research on the development of residual strain in seasonal frozen soil under freezing-thawing and impact type traffic loads. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2021, V.20, No.2, pp.335-345. DOI: 10.1007/s11803-021-2001-3.
17. Wang J., Liu H. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, No. 36(4), pp. 633–639.
18. Karlov V.D. Osnovaniya i fundamenty na sezonopromerzayushchih puchinistyh gruntah. *Monografiya; – M.: SPb.: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskij gos. arhitekturno-stroitel'nyj universitet*, 2007, 350s.
19. Skvorcov D.S., Kraev A.N., Kraev A.N., Zhajsambaev E.A. Sposoby bor'by s moroznym pucheniem sezonopromerzayushchih gruntov v osnovaniyah fundamentov zdaniy i sooruzhenij. *Vestnik Evrazijskoj nauki*, 2020, №5, T. 11.

20. Obsharova A.V., Grishina A.S. Effect of the fiber reinforcement on the mechanical properties of clay soils, including properties under conditions of seasonal freezing and thawing. *Journal of physics: conference series*, 2021, T.1928, P. 012067
21. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B. Analiz izmeneniya prochnostnyh i deformacionnyh svoystv grunta, armirovannogo geosinteticheskimi materialami pri raznoj stepeni vodonasyshcheniya. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2014, № 4, S. 264-273.
22. Guharay A., Mazhar S. Effect of natural fiber reinforcement on strength response of alkali activated binder treated expansive soil: experimental investigation and reliability analysis. *Construction and Building Materials*, 2020, V. 273.
23. Yang Z., Zhang Q., Shi W., Ly J., Lu Z., Ling X. Advances in properties of rubber reinforced soil. *Advances in Civil Engineering*, 2020, No.10, p.16.
24. Ghazavi M., Ghorehshizadeh S. Laboratory Investigation on Thermal Conductivity of Geotextile-Reinforced Soils. *Research square*, 2024, pp. 25. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3859386/v1
25. He P., Hou G., Cao H., Yue F. The influence of geosynthetic properties on their shear behaviors at the interface with frozen soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, No.53, pp. 497-509. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.11.011
26. Mashchenko A.V. K voprosu opredeleniya deformacionnyh harakteristik gruntov v usloviyah sezonnogo promerzaniya i ottaivaniya. *Stroitel'stvo i arhitektura*, 2015, T. 3, № 2, S. 87-89.
27. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B. Vliyanie razlichnyh tipov armirovaniya na deformacionnye harakteristiki glinistogo grunta v usloviyah sezonnogo promerzaniya i ottaivaniya. *V sbornike: Vtoroj Mezhdunarodnyj simpozium zemlyanogo polotna v holodnyh regionah. materialy simpoziuma. pod red. A.L. Isakova i C.K. Lyu.*, 2015, S. 143-147.
28. Mashchenko A.V. Vliyanie armirovaniya geosinteticheskimi materialami na puchinistye svoystva gruntov. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, № 6 (53), S. 100-10329.
29. Correia A., Oliveira P. Strength of a stabilised soil reinforced with steel fibres. *Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering*, 2017, V.170, No. 4, pp. 312–321.
30. Wang Y., Mao T., Xia Y., Li X. Macro-meso fatigue failure of bimrocks with various block content subjected to multistage fatigue triaxial loads. *International Journal of Fatigue*, 2022, V. 163, pp. 107014.
31. Chernysheva I.A., Mashchenko A.V. Sravnenie metodov zashchity ot moroznogo pucheniya grunta. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2016, T. 7, № 4, S. 64-72.
32. Paul S., Islam M.S., Chakma N. Effectiveness of areca fiber and cement on the engineering characteristics of compressed stabilized earth blocks. *Construct. Build. Mater*, 2024, No.427, 136290.
33. Chen L., Guo R.P., Li G.X. Research on preventing soil frost heave with geotechnical reinforcement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, V.3, pp. 84–88.
34. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B. Analiz vliyaniya armirovaniya fibrovloknom na svoystva glinistyh gruntov v usloviyah sezonnogo promerzaniya i ottaivaniya. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2016, № 44-1(63), S.40-50.35.
35. Zhang J., Peng J., Zhang A., Li J. Prediction of permanent deformation for subgrade soils under traffic loading in southern China. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, pp. 1–10, 2020

36. Zhang J., Li F., Zeng L., Peng J., Li J. Numerical simulation of the moisture migration of unsaturated clay embankments in southern China considering stress state. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, V. 80, No.1, pp. 11–24.
37. Deng Q., Liu X., Zeng C., He X., Chen F., Zhang S. A freezing-thawing damage characterization method for highway subgrade in seasonally frozen regions based on thermal-hydraulic-mechanical coupling model. *Sensors*, 2021, No.21, 6251.
38. Biswas N., Puppala A.J., Khan M.A., Congress S.S., Banerjee A., Chakraborty S. Evaluating the performance of wicking geotextile in providing drainage for flexible pavements built over expansive soils. *Transp. Res. Rec.*, 2021, No.2675, pp. 208–221.
39. Tang T., Shen Y., Liu X. et al. The effect of horizontal freezing on the characteristics of water migration and matric suction in unsaturated silt. *Eng. Geol.*, 2021, No.288, 106166.
40. Liu H., Han J., Al-Naddaf M., Parsons R.L., Kakrasul J.I. Field monitoring of wicking geotextile to reduce soil moisture under a concrete pavement subjected to precipitations and temperature variations. *Geotext. Geomembr.*, 2022, No.50, 1004–1019.
41. Jiang Y., Alajlan Z., Zapata C., Yu X. A Multiphysics Simulation of the Effects of Wicking Geotextile on Mitigating Frost Heave under Cold Region Pavement. *Geosciences*, 2024, No.14 – 34. DOI:10.3390/geosciences14020034
42. Timm D.H., Priest A.L., McEwen T.V. Design and instrumentation of the structural pavement experiment at the ncat test track. *National Center for Asphalt Technology (NCAT)*, 2004, Report 04-01.
43. Huang M., Lin C., Pokharel S.K. Freeze-thaw behavior of geocell-reinforced bases considering different fines contents. *Geosynth. Int.*, 2023, No 31(3), pp. 221–238
44. Huang M., Sanat K., Liu M., Cheng Lin. Freeze-thaw impacts on geocell-stabilized bases considering effects of water supply and compaction. *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, No. 53, pp. 81-95. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.09.002
45. Huang M., Lin C., Pokharel S.K., Tura A., Mukhopadhyaya P. Model tests of freeze-thaw behavior of geocell-reinforced soils. *Geotext. Geomembranes*, 2023, No.49 (3), pp. 669–687
46. Jiang H., Zhang M., Wang Z., Wang Y., Wang Z., Sun X. A novel two-layer composite geomembrane lining structure to mitigate frost damage in cold-region canals: Model test and numerical simulation. *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, No.53, pp.510-527. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.11.013
47. Bai R.Q., Lai Y.M., Pei W.S., Zhang M.Y. Investigation on frost heave of saturated–unsaturated soils. *Acta Geotech*, 2020, No.15, pp. 3295–3306. DOI: 10.1007/s11440-020-00952-6.
48. Jiang H.Y., Li L.X., Wang Z.Z., Gong J.W., Sun T., Li H.X. Anti-frost heave design method for a parabolic canal based on the hydraulic optimal solution set in seasonally frozen regions. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2022, No.193, 103433. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103433
49. Zhai H., Mallick S.B., Elton D., Adanur S. Performance evaluation of nonwoven geotextiles in soil-fabric interaction. *Textil. Res. J.*, 1996, No.66 (4), pp. 269–276.
50. Wan X., Zhou H., Zhou F., Zhu J., Shahab K.M. Mesoscopic shear evolution characteristics of frozen soil-concrete interface. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2024, 104342
51. Shi R.J. Huang F., Yue F.T. A Method for Suppressing Frost Heave Deformation of Fiber. *Improved Ground*, 2021, No. 5.
52. Wang Y., Su Y., Xia Y., Wang H. On the effect of confining pressure on fatigue failure of block-in-matrix soils exposed to multistage cyclic triaxial loads. *Fatigue & Fracture Geofluids 13 of Engineering Materials & Structures*, 2022, V.45, No.9, pp. 2481-2498.

53. Zhou J., Wei C., Wei H. Experimental and theoretical characterization of frost heave and ice lenses. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, V.104-105, No. 3, pp. 76-87.
54. Shi R., Huang F., Yue F., Hong Z. Experimental Study on Frost Heave Behavior of Steel Fiber Improved Soil, *Hindawi Geofluids*, 2022, DOI:10.1155/2022/1601398
55. Lu J., Deng F., Pei W., Wan X., You Z., Zhang Z. Mitigating frost heave and enhancing mechanical performance of silty clay with sisal fibre and geopolymer. *Construct. Build. Mater.*, 2024, No.447, 138120.
56. Liu Y., Wang Q., Liu S., Shang Y. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2014, No.161, pp. 32–42.
57. Deng F., Lu J., Wan X., Liu B. Mitigating frost heave of a soil stabilized with sisal fiber exposed to freeze-thaw cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, No. 53, pp. 394-404. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2024.10.005
58. Kuznecov A.A., Kuklina M.O., Gubanov E.V., Gorshkov I.V., Paramonov I.N. Vliyanie cikla zamorazhivaniya-ottaivaniya na fizicheskie, mekhanicheskie i deformacionnye harakteristiki grunta. *Innovacionnye nauchnye issledovaniya*, 2021, №9-2(11), 39-48s, DOI:10.5281/zenodo.5529323
59. Kuznecov A.A., Muginova M.O., Paramonov I.N. Vliyanie cikla zamorazhivaniya-ottaivaniya na modul' deformacii glinistogo grunta s razlichnoj vlazhnost'yu. *Innovacionnye nauchnye issledovaniya*, 2022, №5-1(19), 66-71s. DOI: 10.5281/zenodo.6613609
60. Laprade R., Nesbit B. Geosynthetic solutions for road stabilization and railway ballast optimization over frost susceptible and expansive clays: A case study of the Cargill Canola processing facility. *E3S Web of Conferences*, 2024, No.569, pp. 29004. DOI: 10.1051/e3sconf/202456929004
61. AREMA, AREMA Manual for Railway Engineering, 2022, V. 4
62. Giroud J.P., Han J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. *I Development of Design Method, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (ASCE 2004)