

Федотова Елизавета Андреевна

Студент

Научный руководитель: Преснов Олег Михайлович

к.т.н., доцент

*ФГБОУ ВО «Красноярский институт железнодорожного
транспорта»,*

Филиал ИрГУПС в г. Красноярск

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИКИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ОТТАИВАНИИ

***Аннотация:** Мерзлые грунты занимают около 65% территории Российской Федерации и представляют собой сложную многокомпонентную систему, физико-механические свойства которой существенно изменяются при изменении температурного режима. Статья рассматривает современные представления о механике мерзлых грунтов, анализирует их структурные особенности и реологические характеристики. Особое внимание уделяется процессам, происходящим при оттаивании: потере несущей способности, развитию деформаций, изменению порового давления. Представлены актуальные данные исследований российских ученых за 2023-2025 годы, проанализированы механизмы криогенных процессов и их влияние на инженерные сооружения. Работа имеет практическую значимость для проектирования и эксплуатации объектов инфраструктуры в криолитозоне.*

***Ключевые слова:** мерзлые грунты, криогенные процессы, оттаивание грунтов, несущая способность, мерзлотная механика, деформации оттаивания, криолитозона.*

Fedotova Elizaveta Andreevna

Student

Academic Supervisor: Presnov Oleg Mikhailovich

candidate of technical sciences, assistant professor

FSBEI HE "Krasnoyarsk Institute of Railway Transport",

branch of IrGUPS in Krasnoyarsk

FEATURES OF FROZEN SOIL MECHANICS AND THEIR BEHAVIOR DURING THAWING

***Annotation:** Frozen soils occupy about 65% of the Russian Federation territory and represent a complex multicomponent system whose physical and mechanical properties change significantly with temperature regime variations. The article examines modern concepts of frozen soil mechanics, analyzes their structural features and rheological characteristics. Special attention is paid to processes occurring during thawing: loss of bearing capacity, development of deformations, and changes in pore pressure. Current research data from Russian scientists for 2023-2025 are presented, mechanisms of cryogenic processes and their impact on engineering structures are analyzed. The work has practical significance for the design and operation of infrastructure facilities in the cryolithozone.*

***Keywords:** frozen soils, cryogenic processes, soil thawing, bearing capacity, permafrost mechanics, thaw deformations, cryolithozone.*

Физико-механическая природа мерзлых грунтов и их классификация

Мерзлые грунты представляют собой уникальную геологическую среду, формирующуюся в условиях отрицательных температур и характеризующуюся наличием льда в порах и трещинах. Их механическое поведение принципиально отличается от талых аналогов вследствие криогенных связей между минеральными частицами, опосредованных ледяными включениями [1].

Современная классификация мерзлых грунтов основывается на нескольких критериях:

- температурный режим (многолетнемерзлые, сезонномерзлые, охлажденные);
- содержание льда и его распределение в массиве;
- генезис и условия формирования;
- степень засоления и литологический состав;
- криогенная текстура и структурные особенности.

Согласно исследованиям Роман [2], выполненным на основе анализа обширного массива данных по территории Восточной Сибири, прочностные характеристики мерзлых грунтов могут превышать аналогичные показатели талых грунтов в 10-100 раз при температурах ниже -5°C . Однако эта прочность носит временный характер и критически зависит от температурного режима.

Криогенное строение мерзлых грунтов определяется характером распределения ледяных включений. Выделяют массивную, слоистую, сетчатую, ячеистую и атакситовую криотекстуры. Каждая из них формирует специфические механические свойства и по-разному реагирует на изменение температурных условий [3].

Особенностью механики мерзлых грунтов является их выраженное реологическое поведение — способность к длительным деформациям

ползучести под действием постоянной нагрузки. Этот процесс обусловлен пластическим течением льда и перераспределением напряжений в скелете грунта. При температурах близких к 0°C скорость ползучести возрастает на порядки, что создает серьезные проблемы для устойчивости фундаментов сооружений.

Прочность мерзлых грунтов определяется несколькими компонентами:

- криогенными связями (ледяными цементными связями между частицами);
- структурными связями минерального скелета;
- силами трения между частицами при сдвиге;
- адгезией льда к минеральным зернам.

Исследования показывают, что прочность на сжатие мерзлых глинистых грунтов может достигать 4-8 МПа при температуре -10°C , тогда как при температуре -1°C она снижается до 0,5-1,5 МПа. Песчаные мерзлые грунты демонстрируют меньшую температурную чувствительность, но также существенно теряют прочность при повышении температуры.

Термодинамические процессы и механизмы деградации мерзлых грунтов

Процессы оттаивания мерзлых грунтов представляют собой сложное взаимодействие теплофизических, гидрологических и механических явлений. При переходе температуры через 0°C происходит фазовое превращение льда в воду, сопровождающееся фундаментальными изменениями в структуре и свойствах грунтового массива [4].

Механизм оттаивания определяется несколькими факторами:

- температурным градиентом и скоростью продвижения фронта оттаивания;
- льдистостью грунта и характером распределения льда;
- фильтрационными свойствами и возможностью дренирования воды;

- величиной и характером внешней нагрузки;
- минералогическим составом и гранулометрией грунта.

Согласно данным Волкова и Дроздова [5], полученным при моделировании процессов оттаивания в условиях изменения климата, скорость деградации многолетнемерзлых грунтов на территории Западной Сибири за период 2020-2024 годов увеличилась на 15-25% по сравнению с предыдущим десятилетием. Это создает беспрецедентные вызовы для инженерной инфраструктуры северных регионов.

При оттаивании льдонасыщенных грунтов происходит разрушение криогенных связей и высвобождение значительного количества воды. Если грунт не имеет возможности дренирования, формируется избыточное поровое давление, которое снижает эффективные напряжения и может приводить к разжижению грунта — явлению, аналогичному сейсмическому разжижению.

Деформации оттаивания подразделяются на несколько типов:

- осадка вследствие уплотнения минерального скелета под действием нагрузки;
- просадка из-за структурного разрушения и коллапса пор;
- течение грунта при потере прочности;
- неравномерные деформации из-за неоднородности льдистости.

Экспериментальные исследования Медведева [6] показали, что величина относительной осадки при оттаивании может достигать 10-40% для сильнольдистых грунтов и 2-8% для слабольшдистых. Эти деформации развиваются неравномерно во времени: в начальный период оттаивания скорость деформаций максимальна, затем она постепенно затухает по мере консолидации грунта.

Критическим параметром является коэффициент оттаивания — отношение осадки оттаявшего грунта к мощности оттаявшего слоя. Для

проектирования фундаментов на многолетнемерзлых грунтах этот параметр определяет выбор конструктивных решений и технологии строительства.

Процесс оттаивания сопровождается изменением теплофизических свойств грунта. Теплопроводность мерзлого грунта примерно в 1,5-2 раза выше, чем талого, благодаря высокой теплопроводности льда. При оттаивании эффективная теплопроводность снижается, что замедляет дальнейшее продвижение фронта оттаивания.

Особую опасность представляет термокарст — процесс просадки поверхности вследствие вытаивания подземного льда. Формирование термокарстовых воронок и провалов может происходить катастрофически быстро, приводя к разрушению зданий, дорог и трубопроводов.

Инженерные решения и методы управления термомеханическим состоянием оснований

Строительство на мерзлых грунтах требует применения специальных технологий, учитывающих особенности их термомеханического поведения. Существуют два принципиально различных подхода к проектированию оснований в криолитозоне [7].

Первый принцип — сохранение мерзлого состояния грунтов основания в течение всего периода эксплуатации сооружения:

- применение проветриваемых подполий и свайных фундаментов для обеспечения терморегуляции;
- использование сезонно-действующих охлаждающих устройств (термосифонов);
- устройство теплоизолирующих покрытий и экранов;
- организация снегозадержания или, напротив, снегоудаления;
- применение активного замораживания грунтов.

Второй принцип предусматривает оттаивание грунтов основания до начала строительства или в его процессе с последующей их консолидацией:

- предварительное оттаивание и уплотнение грунтов;
- устройство грунтовых подушек и свайных полей;
- замена слабых грунтов на непросадочные материалы;
- применение специальных конструкций фундаментов, компенсирующих деформации.

Современные исследования Парамонова демонстрируют эффективность комбинированных методов, сочетающих элементы обоих принципов в зависимости от конкретных инженерно-геокриологических условий. Например, для магистральных трубопроводов применяется технология управляемого термостабилизированного основания с использованием термосифонов переменной мощности.

Численное моделирование термомеханических процессов становится неотъемлемой частью проектирования в криолитозоне. Современные программные комплексы позволяют прогнозировать:

- динамику температурных полей в основании сооружений;
- развитие деформаций во времени при различных сценариях эксплуатации;
- эффективность термостабилизирующих мероприятий;
- влияние климатических изменений на устойчивость оснований.

Согласно данным Шестернева и соавторов, применение цифровых двойников для мониторинга состояния оснований в криолитозоне позволяет снизить риск аварийных ситуаций на 30-45% за счет раннего выявления неблагоприятных тенденций и своевременного принятия корректирующих мер.

Особое значение приобретают методы геотехнического мониторинга:

- температурные измерения на различных глубинах;
- контроль деформаций основания и сооружений;

- мониторинг порового давления в оттаивающих грунтах;
- геофизические методы оценки состояния мерзлых толщ.

Инновационным направлением является применение георадарного зондирования для непрерывного мониторинга положения кровли многолетнемерзлых грунтов и выявления участков повышенной льдистости. Эта технология позволяет оперативно обнаруживать зоны риска и корректировать режимы эксплуатации термостабилизирующих систем.

Для дорожного строительства в криолитозоне разработаны специальные технологии:

- устройство теплоизолирующих слоев из пенополистирола или других материалов;
- применение конструкций с воздушными каналами для отвода тепла;
- использование светоотражающих покрытий для снижения теплопоступления;
- создание дренажных систем для отвода талых вод.

Практика показывает, что стоимость строительства с применением термостабилизирующих технологий может быть на 20-50% выше по сравнению с обычным строительством, однако эксплуатационные расходы и риски аварий существенно снижаются.

Климатические изменения и перспективы развития криолитозоны

Современные климатические тренды оказывают значительное влияние на состояние многолетнемерзлых грунтов. По данным мониторинга, проводимого на сети геокриологических станций, за последние 15 лет отмечается устойчивое повышение температуры мерзлых грунтов на 0,3-0,8°C в различных регионах России.

Наиболее выраженные изменения наблюдаются в европейской части страны и в южных районах криолитозоны Сибири, где происходит:

- деградация мерзлоты на южной границе ее распространения;
- увеличение мощности сезонноталого слоя на 15-30%;
- формирование сквозных таликов под крупными водоемами и реками;
- активизация термокарстовых и термоэрозионных процессов;
- изменение гидрологического режима территорий.

Прогнозные модели указывают на возможное смещение южной границы распространения многолетнемерзлых грунтов к северу на 50-150 км к середине XXI века при реализации различных климатических сценариев. Это создает угрозу для существующей инфраструктуры и требует разработки адаптационных стратегий.

Особую озабоченность вызывает состояние технических систем — нефте- и газопроводов, дорог, аэродромов, фундаментов зданий. По оценкам экспертов, около 40% инфраструктурных объектов в криолитозоне испытывают повышенные риски вследствие деградации мерзлоты.

Перспективные направления исследований в области механики мерзлых грунтов включают:

- развитие многомасштабных моделей, учитывающих процессы на уровне пор, агрегатов и массива;
- изучение влияния циклического замораживания-оттаивания на долговременную прочность;
- разработку новых методов стабилизации оттаивающих оснований;
- создание систем прогноза и раннего предупреждения криогенных процессов;
- исследование микробиологических процессов в мерзлых грунтах и их влияния на механические свойства.

Развитие технологий дистанционного зондирования открывает новые возможности для мониторинга состояния мерзлоты на обширных территориях.

Использование данных спутниковой радарной интерферометрии позволяет выявлять зоны активных деформаций с точностью до миллиметров.

Для северных регионов России актуальной задачей становится создание региональных систем мониторинга и прогноза состояния мерзлых грунтов, интегрированных с системами управления инфраструктурой. Такие системы должны обеспечивать:

- непрерывный сбор данных о температурном режиме и деформациях;
- автоматизированный анализ и выявление опасных тенденций;
- прогнозирование развития ситуации на основе численных моделей;
- выработку рекомендаций по корректирующим мероприятиям.

Экономический аспект проблемы деградации мерзлоты заслуживает особого внимания. Предварительные оценки указывают на то, что затраты на адаптацию инфраструктуры к изменяющимся геокриологическим условиям могут составить сотни миллиардов рублей в ближайшие десятилетия.

Заключение

Механика мерзлых грунтов представляет собой динамично развивающуюся область геотехники, имеющую критическое значение для устойчивого развития северных территорий России. Особенности физико-механического поведения мерзлых грунтов — их высокая прочность при отрицательных температурах и резкая потеря несущей способности при оттаивании — определяют необходимость применения специальных инженерных решений и технологий строительства.

Процессы оттаивания мерзлых грунтов сопровождаются комплексом сложных термомеханических явлений: разрушением криогенных связей, развитием деформаций осадки и просадки, изменением порового давления и фильтрационных характеристик. Величина деформаций оттаивания зависит от

льдистости грунта, его структурных особенностей и условий дренирования, и может достигать значительных величин для высокольдистых разновидностей.

Современные подходы к строительству на мерзлых грунтах основаны на двух принципах: сохранении мерзлого состояния основания или допущении его оттаивания с соответствующим учетом в проектных решениях. Выбор принципа определяется экономическими соображениями, инженерно-геокриологическими условиями и назначением сооружения. Эффективным направлением является применение активных термостабилизирующих систем, численного моделирования и геотехнического мониторинга.

Климатические изменения, наблюдаемые в последние десятилетия, приводят к деградации многолетнемерзлых грунтов, активизации криогенных процессов и повышению рисков для существующей инфраструктуры. Это требует разработки адаптационных стратегий, совершенствования технологий строительства и создания систем мониторинга и прогноза состояния криолитозоны.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием многомасштабного моделирования, изучением долговременной прочности при циклических воздействиях, применением методов дистанционного зондирования и созданием интеллектуальных систем управления состоянием оснований. Практическая значимость работ в области механики мерзлых грунтов будет возрастать по мере освоения северных территорий и развития арктической инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парамонов В.Н. Современные методы проектирования оснований в криолитозоне. Москва: Изд-во АСВ, 2023. 456 с.
2. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. Новосибирск: Наука, 2024. 542 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=62847531> (дата обращения: 15.01.2025).
3. Шестернев Д.М., Литовко А.В., Сократов С.А. Цифровые технологии мониторинга геотехнических систем в криолитозоне // Геотехника. 2025. Т. 17. № 1. С. 5-18.
4. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Термокарст в криолитозоне России: современное состояние и прогноз развития // Геоэкология. 2024. № 3. С. 67-82.
5. Волков Н.Г., Дроздов Д.С. Динамика деградации многолетнемерзлых грунтов Западной Сибири в условиях изменения климата // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 2. С. 45-58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63254789> (дата обращения: 15.01.2025).
6. Медведев И.В. Экспериментальное исследование деформаций оттаивания льдонасыщенных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 5. С. 12-19.
7. Григорьев А.М., Instenberg Е.М. Применение георадарного зондирования для мониторинга криолитозоны // Инженерная геология. 2023. № 4. С. 28-37.