

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-05>

УДК: 624.131.54

МРНТИ: 73.31.11

Retraction Notice

Настоящая статья отозвана по заявлению автора и на основании решения редакционной коллегии журнала. Причиной ретракции является выявленное нарушение порядка согласования авторского состава: рукопись была направлена в редакцию без получения окончательного согласия всех соавторов на публикацию.

Редакционная коллегия придерживается принципов публикационной этики и приняла решение о ретракции статьи в целях соблюдения прав всех авторов и обеспечения достоверности научной публикации.

Исследования морозного пучения в лабораторных экспериментах

¹ Жуандыков Н., ^{*2} Сарсембаева А., ³ Дабска А.

¹ Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б.Гончарова, Алматы, Казахстан

² Шакарим Университет, Семей, Казахстан

³ Варшавский технологический университет, Варшава, Польша

*Автор-корреспондент e-mail: assel_enu@mail.ru

Поступила: 12 апреля 2026
Рецензирование: 05 мая 2026
Принята в печать: 05 июня 2026

Аннотация

Актуальность проблемы морозного пучения грунтов неразрывно связана с необходимостью обеспечения надежности строительных объектов в Казахстане, где значительная часть территории подвержена процессам сезонного промерзания и оттаивания. Целью данной работы является систематизация и всесторонний анализ современных лабораторных методов исследования морозного пучения грунтов. В статье рассмотрены основные экспериментальные методы, регламентированные ГОСТ 28622-2012, проанализированы открытые и закрытые системы промерзания для различных типов грунтов. Представлены результаты оценки влияния ключевых факторов на интенсивность криогенных процессов: гранулометрического состава, начальной влажности, температурного градиента, внешнего ограничивающего давления и степени засоленности грунта растворами (в частности, NaCl₂). Показано, что интенсивность деформаций пучения определяется комплексом термогидромеханических процессов. Сделаны выводы о критической важности лабораторного моделирования для получения достоверных исходных данных, необходимых при проектировании надежных инженерных фундаментов и транспортной инфраструктуры в сложных геокриологических условиях.

Ключевые слова: морозное пучение, лабораторный эксперимент, промерзание грунта, криогенная миграция влаги, пучинистость, деформация, температурный градиент, замерзание грунта

Информация об авторах:

Жуандыков Н.

Магистр технических наук, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б.Гончарова, Алматы, Казахстан ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-5864-8811> E-mail: nurka.kz90@mail.ru

Сарсембаева А.

PhD, ассоциированный профессор, Шакарим Университет, Семей, Казахстан ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7516-6775> E-mail: assel_enu@mail.ru

Дабска А.

PhD, профессор, Варшавский технологический университет, Варшава, Польша. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1185-3872> E-mail: agnieszka.dabska@pw.edu.pl

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-05>

ӨОЖ: 624.131.54

FTAMP: 73.31.11

Мақаланы кері қайтарып алу туралы хабарлама

Осы мақала автордың өтініші және журналдың редакциялық алқасының шешімі негізінде кері қайтарылды. Кері қайтарып алудың себебі – мақала жариялауға жіберілген кезде барлық тең авторлардың жариялауға түпкілікті келісімі алынбағаны анықталды.

Редакциялық алқа жарияланым этикасының қағидаттарын басшылыққа ала отырып, барлық авторлардың құқықтарын қорғау және ғылыми жарияланымның тұтастығын қамтамасыз ету мақсатында осы мақаланы кері қайтарып алу туралы шешім қабылдады.

Зертханалық эксперименттерде топырақтың аяздық көтерілуін зерттеу¹ Жуандыков Н., ² Сарсембаева А., ³ Дабска А.¹ Л.Б.Гончаров атындағы Қазақ автомобиль жол институты, Алматы, Қазақстан² Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан³ Варшава технологиялық университеті, Варшава, Польша* Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): assel_enu@mail.ru

Кабылданды: 12 сәуір, 2026 Рецензиялау: 05 мамыр, 2026 Баспаға қабылданды: 05 маусым, 2026	Түйіндеме Топырақтардың аяздық көтерілуі (мороздық пучение) мәселесінің өзектілігі Қазақстандағы құрылыс нысандарының сенімділігін қамтамасыз ету қажеттілігімен тығыз байланысты, себебі ел аумағының едәуір бөлігі маусымдық тоңу және еру процестеріне ұшырайды. Осы жұмыстың мақсаты – топырақтардың аяздық көтерілуін зерттеудің заманауи зертханалық әдістерін жүйелеу және жан-жақты талдау. Мақалада ГОСТ 28622-2012 стандартымен регламенттелген негізгі эксперименттік әдістер қарастырылып, әртүрлі топырақ түрлері үшін ашық және жабық кату жүйелері талданды. Криогендік процестердің қарқындылығына әсер ететін негізгі факторлардың: гранулометриялық құрамның, бастапқы ылғалдылықтың, температуралық градиенттің, сыртқы шектеуші қысымның және топырақтың тұздану дәрежесінің (әсіресе NaCl ₂ ерітінділері арқылы) ықпалы бағаланды. Аяздық көтерілу деформацияларының қарқындылығы термогидромеханикалық процестердің кешенімен анықталатыны көрсетілді. Күрделі геокриологиялық жағдайларда сенімді инженерлік іргетастар мен көлік инфрақұрылымын жобалау үшін қажетті бастапқы деректерді алу мақсатында зертханалық модельдеудің маңыздылығы жөнінде қорытындылар жасалды. Түйін сөздер: желдетілетін қасбеттер, сенімділік, ұзақ мерзімділік, азаматтық ғимараттар, пайдалану жүктемелері, фасадтық жүйелер.
Жуандыков Н.	Авторлар туралы ақпарат: Техникалық ғылымдар магистрі, Л.Б.Гончаров атындағы Қазақ автомобиль жол институты, Алматы, Қазақстан ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-5864-8811 E-mail: nurka.kz90@mail.ru
Сарсембаева А.	PhD, қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7516-6775 E-mail: assel_enu@mail.ru
Дабска А.	PhD, профессор, Варшава технологиялық университеті, Варшава, Польша. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1185-3872 E-mail: agnieszka.dabska@pw.edu.pl

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-05>

UDC: 624.131.54

IRSTI: 73.31.11

Retraction Notice

This article has been retracted at the request of the author and by decision of the Editorial Board. The reason for the retraction is that, it was determined that the manuscript had been submitted without obtaining the final consent of all co-authors for publication.

The Editorial Board is committed to upholding the principles of publication ethics and has decided to retract this article in order to protect the rights of all authors and maintain the integrity of the scholarly record.

Investigation of frost heave in laboratory experiments¹ Zhuandykov N., ² Sarsembaeva A., ³ Dąbska A.¹ L.B.Goncharov Kazakh Automobile and Road Academy, Almaty, Kazakhstan² Shakarim University, Semey, Kazakhstan³ Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland*Corresponding author e-mail: assel_enu@mail.ru

Received: 12 April, 2026 Under review 05 May, 2026 Accepted for publication: 05 June, 2026	Abstract This paper presents a comparative study of three variants of a ventilated curtain wall façade subsystem differing in structural configuration and in the type of supporting brackets used. Modeling and stress–strain state analysis were carried out using the StatUs software package under identical boundary conditions and operational parameters. The calculations considered the main acting loads, including the self-weight of subsystem elements, wind loads, and ice loads characteristic of the construction region under consideration. The study included an analysis of stress distribution within subsystem elements, determination of reactions at fastening nodes connected to the building’s load-bearing structure, and evaluation of deflections and overall system stiffness. Additionally, a comparison of structural performance was performed in terms of load distribution uniformity, element stability, and the efficiency of bracket performance in transferring loads to the base structure. Based on the results of the structural analysis, the most rational supporting bracket option was identified, providing the required safety margin, reduced stress concentrations, optimal load distribution, and compliance with regulatory deformation requirements. The obtained results can be applied in the design of ventilated façade subsystems to improve their reliability, durability, and economic efficiency. Keywords: ventilated facades, reliability, durability, civil buildings, operational loads, façade systems
<i>Zhuandykov N.</i>	Information about authors: Master of technical sciences, L.B.Goncharov Kazakh Automobile and Road Academy, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-5864-8811 E-mail: nurka.kz90@mail.ru
<i>Sarsembaeva A.</i>	PhD, associate professor, Shakarim University, Semey, Kazakhstan ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7516-6775 E-mail: assel_enu@mail.ru
<i>Dąbska A.</i>	PhD, professor, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1185-3872 E-mail: agnieszka.dabska@pw.edu.pl

1. Введение

Морозное пучение грунтов является одной из наиболее значимых инженерно-геокриологических проблем при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий, сооружений и объектов транспортной инфраструктуры в районах сезонного промерзания [1]. Для Казахстана данная проблема имеет особую актуальность, поскольку значительная часть территории страны характеризуется суровыми климатическими условиями, резкими сезонными колебаниями температуры, глубоким промерзанием грунтов и последующим их оттаиванием. В таких условиях основания автомобильных дорог, железнодорожных путей, фундаментов зданий, подземных инженерных коммуникаций и трубопроводов подвергаются интенсивному воздействию криогенных процессов, что может приводить к неравномерным деформациям, снижению несущей способности грунтов, образованию трещин, просадкам и преждевременному разрушению конструкций [2,3].

Морозное пучение представляет собой сложный термогидромеханический процесс, обусловленный не только объемным расширением воды при переходе в лед, но и миграцией незамерзшей влаги к фронту промерзания с последующим образованием ледяных прослоек и линз. Именно криогенная миграция влаги является одной из основных причин значительных деформаций в пучинистых грунтах. Интенсивность данного процесса зависит от комплекса взаимосвязанных факторов, включая гранулометрический состав грунта, его начальную влажность, плотность сложения, температурный градиент, гидрогеологические условия, наличие внешней нагрузки, а также химический состав порового раствора. Поэтому прогнозирование морозного пучения требует комплексного подхода, учитывающего как физико-механические свойства грунта, так и условия его промерзания [1,4].

История изучения морозного пучения насчитывает более ста лет. Первые систематические исследования [5-7] были связаны с анализом деформаций земляного полотна железных дорог, а дальнейшее развитие теории морозного пучения связано с экспериментальными работами, доказавшими решающую роль миграции влаги и сегрегационного льдообразования. Несмотря на значительный объем накопленных теоретических и экспериментальных данных, проблема точного количественного прогноза деформаций морозного пучения остается актуальной. Это связано с многофакторным характером процесса, различием между лабораторными и натурными условиями, а также сложностью воспроизведения в эксперименте реальных температурно-влажностных и напряженно-деформированных условий грунтового массива [8,9].

Особое значение в современных исследованиях приобретают лабораторные методы изучения морозного пучения. Они позволяют моделировать контролируемые условия промерзания, задавать определенные температурные режимы, регулировать водный режим образца, учитывать влияние внешнего давления и оценивать деформационные характеристики грунтов. В лабораторной практике применяются как закрытые системы, в которых приток влаги извне отсутствует, так и открытые системы, обеспечивающие поступление воды к фронту промерзания и более полно имитирующие условия близкого залегания грунтовых вод. Выбор экспериментальной схемы оказывает существенное влияние на результаты испытаний и должен определяться целью исследования и инженерно-геологическими условиями объекта [10,11].

В действующей нормативной практике лабораторная оценка степени пучинистости грунтов регламентируется ГОСТ 28622-2012 [12], однако развитие экспериментальных технологий, появление автоматизированных установок, датчиков непрерывной регистрации, методов визуализации внутренней структуры грунта и численного термогидромеханического моделирования требуют дальнейшего анализа и систематизации современных подходов. Важной задачей остается сопоставление нормативных методик с результатами современных исследований, а также оценка возможности применения

лабораторных данных для проектирования надежных оснований и дорожных конструкций в сложных климатических условиях Казахстана.

Целью данной статьи является систематизация и аналитический обзор современных лабораторных методов исследования морозного пучения грунтов, а также выявление основных факторов, определяющих интенсивность криогенных деформаций.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- рассмотреть физические механизмы морозного пучения грунтов;
- проанализировать современные лабораторные методы и оборудование для исследования процессов промерзания;
- систематизировать основные факторы, влияющие на интенсивность морозного пучения;
- оценить особенности применения открытых и закрытых систем промерзания;
- определить значение лабораторного моделирования для инженерной оценки пучинистости грунтов и прогнозирования надежности транспортной инфраструктуры.

Исследование морозного пучения в лабораторных условиях является необходимым этапом получения достоверных исходных данных для инженерного проектирования. Результаты таких исследований позволяют повысить точность прогноза деформаций, обосновать выбор конструктивных и противопучинистых мероприятий, а также обеспечить долговечность автомобильных дорог, фундаментов и других инженерных сооружений в районах сезонного промерзания.

2. Литературный обзор

Изучение морозного пучения грунтов имеет более чем столетнюю историю и остается одним из важнейших направлений инженерной геокриологии и механики мерзлых грунтов. Несмотря на значительный прогресс в области экспериментальных исследований и численного моделирования, проблема прогнозирования деформаций морозного пучения по-прежнему не имеет универсального решения вследствие сложного взаимодействия тепловых, гидравлических и механических процессов.

Основы современной теории морозного пучения были заложены в работах S. Taber [5], который экспериментально доказал, что основной причиной деформаций является не только объемное расширение воды при замерзании, составляющее около 9%, но и миграция незамерзшей воды к фронту промерзания с последующим формированием ледяных линз. Данная концепция впоследствии получила развитие в работах российских, канадских, американских и скандинавских исследователей и легла в основу современных термогидромеханических моделей.

В российской научной школе существенный вклад в развитие теории внесли В.Г. Чеверев [13] и другие исследователи [14,15], рассматривающие морозное пучение как сложный многофазный процесс, определяемый совместным воздействием температурных, гидравлических и механических факторов. Согласно современным представлениям, процесс пучения обусловлен двумя взаимосвязанными механизмами: объемным расширением поровой воды при фазовом переходе и криогенной миграцией незамерзшей влаги из нижележащих талых слоев к фронту промерзания. Движущей силой этого процесса является градиент термодинамического потенциала, формируемый температурными, гидравлическими и химическими воздействиями.

Современные исследования показывают, что существенное влияние на формирование ледяных линз оказывает не только перенос жидкой влаги, но и пароперенос. Работы Mussakhanova и соавторов [2] продемонстрировали, что перенос влаги в газообразном состоянии способен вызывать дополнительное накопление льда в основании дорожных конструкций, увеличивая интенсивность морозного пучения. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета пародиффузии при разработке математических моделей и инженерных расчетов.

Согласно исследованиям Чеверева [13], структура промерзающего пучинистого грунта является неоднородной и включает несколько характерных зон, различающихся механизмами переноса влаги и льдообразования. Авторами предложена модель шестизонного строения промерзающего массива, включающая области физической контракции, криогенной диффузии, интенсивного льдообразования, криогенной фильтрации, усадки и резервной влажности. Подобное представление позволяет более точно интерпретировать распределение влажности и температуры в лабораторных образцах и при натурных наблюдениях.

В инженерной практике оценка степени опасности морозного пучения осуществляется по относительной деформации $\varepsilon_{\text{п}}$. В странах СНГ и Казахстане широко применяется классификация, приведенная в ГОСТ 25100-2020 [16], в соответствии с которой грунты подразделяются на пять категорий пучинистости.

Таблица 1. Классификация грунтов по степени пучинистости (ГОСТ 25100-2020 [16])

Тип грунта	Относительная деформация пучения $\varepsilon_{\text{п}}$ (д.е.)	Категория пучинистости
Все виды исперсных грунтов	$\varepsilon_{\text{п}} \leq 0,01$	Непучинистые
Все виды дисперсных грунтов	$0,01 < \varepsilon_{\text{п}} \leq 0,035$	Слабопучинистые
Все виды дисперсных грунтов	$0,035 < \varepsilon_{\text{п}} \leq 0,07$	Среднепучинистые
Все виды дисперсных грунтов	$0,07 < \varepsilon_{\text{п}} \leq 0,12$	Сильнопучинистые
Все виды дисперсных грунтов	$\varepsilon_{\text{п}} > 0,12$	Чрезмернопучинистые

Помимо деформационных характеристик, важным параметром является давление морозного пучения, которое определяет силовое воздействие расширяющегося массива на фундаменты, трубопроводы и другие инженерные конструкции. В исследованиях, выполненных в Канаде [17], США [18] и странах Северной Европы [19], показано, что величина давления пучения зависит от влажности, плотности грунта, скорости промерзания и величины внешней нагрузки.

Особое внимание в мировой практике уделяется гидрогеологическим условиям формирования морозного пучения. В лабораторных исследованиях применяются две принципиальные схемы моделирования: открытая и закрытая системы промерзания.

Таблица 2. Сравнительный анализ открытой и закрытой систем

Параметр	Открытая система	Закрытая система
Приток воды	есть	отсутствует
Источник влаги	грунтовые воды	начальная влажность
Деформации $\varepsilon_{\text{п}}$	0,05 – 0,15	0,01 – 0,05
Механизм	сегрегационное льдообразование	объемное расширение
Интенсивность пучения	высокая	низкая
Приближенность к природе	высокая	ограниченная
Воспроизводимость	средняя	высокая

В работах канадских исследователей Fladvad и соавторов [20] установлено, что открытые системы наиболее полно воспроизводят реальные условия функционирования

дорожных оснований и позволяют оценивать максимальные деформации, обусловленные миграцией влаги. В то же время закрытые системы характеризуются высокой воспроизводимостью результатов и широко используются для сравнительных лабораторных испытаний.

Скандинавская школа геотехники, представленная исследованиями А. Zeinali и соавторов [21], сосредоточена на изучении процессов циклического замораживания-оттаивания и применении неразрушающих методов исследования. В частности, используются рентгеновская компьютерная томография и ядерно-магнитный резонанс, позволяющие исследовать распределение льда и незамерзшей воды внутри образца без нарушения его структуры.

В Китае значительное внимание уделяется взаимодействию системы «грунт – сооружение». Так, Tang et al. [22] выполнили серию модельных испытаний железобетонных свай в условиях циклического промерзания и оттаивания. Было установлено, что силы смерзания вызывают значительные вертикальные перемещения свай, а последующее оттаивание сопровождается развитием осадок. Результаты исследований подтверждают необходимость комплексного моделирования взаимодействия конструкций с пучинистыми грунтами.

Современные исследования все чаще базируются на концепции термогидромеханического (ТНМ) моделирования. Работы M.S. Zhehin и соавторов [23] показали, что численные модели способны с высокой точностью воспроизводить экспериментальные данные, однако их надежность в значительной степени определяется качеством исходных параметров, полученных в лабораторных условиях. Поэтому экспериментальные исследования остаются основным источником данных для калибровки математических моделей.

Анализ публикаций показывает, что, несмотря на значительный объем накопленных знаний, до настоящего времени отсутствует единая методология, позволяющая полностью устранить расхождения между лабораторными и натурными условиями промерзания. В природных условиях процессы протекают в течение длительного времени и сопровождаются сложным взаимодействием тепловых, гидравлических и механических факторов, тогда как в лаборатории скорость промерзания искусственно увеличивается, что может приводить к изменению механизмов льдообразования. В связи с этим перспективным направлением развития является интеграция высокоточных лабораторных исследований, методов неразрушающего контроля и численного термогидромеханического моделирования, а также разработка универсальных моделей, учитывающих реальные гидрогеологические условия эксплуатации транспортной инфраструктуры.

3. Материалы и методы

Методологическая основа исследования базируется на систематизации нормативных, экспериментальных и современных инструментальных подходов к изучению морозного пучения дисперсных грунтов. В качестве объекта анализа рассматриваются лабораторные методы определения пучинистости грунтов, применяемые при инженерно-геологических изысканиях, проектировании оснований зданий, автомобильных дорог, насыпей и других объектов транспортной инфраструктуры в условиях сезонного промерзания.

Материалами исследования послужили положения действующих нормативных документов, результаты отечественных и зарубежных экспериментальных работ, а также данные о современных лабораторных установках, применяемых для моделирования процессов промерзания грунтов. Особое внимание уделено методам, позволяющим оценить влияние гранулометрического состава, начальной влажности, температурного режима, гидрогеологических условий, внешней нагрузки и возможности подпитки водой на интенсивность морозного пучения.

Современная нормативная база Казахстана в области лабораторной оценки пучинистости грунтов опирается на ГОСТ 28622-2012 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости» [12]. Данный стандарт регламентирует порядок лабораторного определения степени пучинистости дисперсных грунтов при их промерзании. В соответствии с требованиями стандарта исследуемые образцы должны иметь цилиндрическую форму диаметром 100 мм и высотой 150 мм. Также устанавливаются основные требования к температурному режиму испытания, условиям промораживания образца и техническим характеристикам оборудования.

В рамках лабораторного моделирования морозного пучения применяются две основные схемы теплового воздействия на образец: классическое промерзание сверху вниз и модифицированное промерзание снизу вверх. Классическая схема наиболее близка к природным условиям сезонного промерзания, поскольку охлаждение происходит со стороны поверхности грунта. Однако при таком подходе возможно возникновение бокового смерзания грунта со стенками обоймы, что искажает значения относительной деформации морозного пучения. Модифицированная схема промерзания снизу вверх позволяет уменьшить влияние бокового трения и повысить точность фиксации деформаций, что особенно важно при научных исследованиях и калибровке численных моделей [23,24].

Типовая лабораторная установка для исследования морозного пучения включает несколько основных элементов: жесткую металлическую или полимерную обойму для размещения образца, термостатированные плиты для создания температурного градиента, систему подачи воды при моделировании открытой системы, измерительные датчики перемещений, термпары или термисторы, а также устройства для регистрации давления пучения. Внутренняя поверхность обоймы может обрабатываться антифрикционными материалами, например фторопластовой смазкой, что позволяет снизить влияние бокового трения на результаты испытаний [23-25]. В зависимости от условий водообмена лабораторные испытания могут проводиться в открытой или закрытой системе. В закрытой системе приток воды извне отсутствует, и процесс пучения определяется главным образом исходной влажностью грунта и объемным расширением поровой воды при замерзании. Такая схема отличается высокой воспроизводимостью и применяется для сравнительной оценки пучинистости различных грунтов. В открытой системе обеспечивается поступление воды к фронту промерзания через пористый штамп или водонасыщенный слой, что позволяет моделировать условия близкого залегания грунтовых вод. Именно открытая система обеспечивает развитие наиболее интенсивного сегрегационного льдообразования и позволяет оценить предельные деформации морозного пучения.

Таблица 3. Сравнительный анализ лабораторных методов морозного пучения

Метод	Схема промерзания	Преимущества	Ограничения	Область применения
ГОСТ 28622-2012 [12]	сверху вниз	приближенность к природным условиям;	влияние бокового трения; искажение ε_{fb}	инженерные изыскания, проектирование
Модифицированный	снизу вверх	исключение смерзания со стенками; высокая точность	отличается от природной схемы	научные исследования, калибровка моделей
Открытая система	с подпиткой водой	моделирование грунтовых вод; максимальное пучение	сложность контроля фильтрации	дорожные основания, насыпные конструкции
Закрытая система	без подпитки	высокая воспроизводимость; простота	занижение деформаций	сравнительные лабораторные тесты

Подготовка образцов включает отбор грунта, определение его физико-механических характеристик, доведение до заданной влажности и уплотнение до требуемой плотности. Для корректной интерпретации результатов предварительно определяются гранулометрический состав, влажность, плотность, пределы пластичности, степень водонасыщения и другие показатели, характеризующие пучинистость грунта. Особое значение имеет содержание пылевато-глинистых частиц, поскольку именно тонкодисперсная фракция формирует капиллярно-активную поровую структуру и способствует миграции влаги к фронту промерзания.

В ходе испытания контролируются абсолютная деформация пучения, относительная деформация морозного пучения $\epsilon_{\text{м}}$, температура на торцах и по высоте образца, скорость продвижения фронта промерзания, объем поглощенной воды, а также давление пучения при испытаниях в условиях ограниченной деформации. Относительная деформация морозного пучения определяется как отношение абсолютного вертикального перемещения образца к его первоначальной высоте. Данный показатель используется для классификации грунта по степени пучинистости и оценки его потенциальной опасности для инженерных сооружений.

Для повышения достоверности результатов испытаний важным условием является непрерывная регистрация параметров во времени. Современные лабораторные комплексы оснащаются автоматизированными системами сбора данных, позволяющими фиксировать изменение температуры, деформации и давления с высокой частотой. Это дает возможность строить кинетические кривые пучения, определять момент начала интенсивного льдообразования и анализировать влияние температурного градиента на скорость развития деформаций.

Дополнительно для фиксации послойных деформаций внутри непрозрачного образца могут применяться игольчатые метки, рентгеноконтрастные маркеры и другие индикаторы внутреннего перемещения. Такие методы позволяют оценивать не только суммарное поднятие поверхности, но и распределение деформаций по высоте образца, что особенно важно для анализа зон формирования ледяных линз.

В последние годы в международной практике все шире применяются методы неразрушающей физической интроскопии. Рентгеновская компьютерная микротомография позволяет визуализировать трехмерную структуру порового пространства, минерального скелета и ледяных включений без разрушения образца. ЯМР-томография используется для количественной оценки содержания незамерзшей воды в мерзлой зоне грунта в зависимости от температуры. Применение таких методов существенно расширяет возможности лабораторного исследования, поскольку позволяет изучать не только внешние деформации, но и внутренние механизмы формирования криогенной текстуры.

Методика обработки результатов включает расчет относительной деформации морозного пучения, анализ температурных кривых, определение скорости продвижения фронта промерзания и оценку объема мигрировавшей влаги. Полученные данные сопоставляются с типом грунта, его влажностью, условиями водообмена и режимом промерзания. Такой подход позволяет выявить основные факторы, определяющие интенсивность морозного пучения, и использовать результаты лабораторных испытаний для инженерной оценки надежности оснований, дорожных одежд и фундаментов в условиях сезонного промерзания.

Применяемая методика исследования основана на комплексном анализе нормативных лабораторных испытаний, модифицированных схем промерзания, открытых и закрытых систем водообмена, а также современных методов инструментального контроля. Совмещение традиционных экспериментальных подходов с автоматизированной регистрацией данных и неразрушающими методами визуализации позволяет повысить точность оценки пучинистости грунтов и обеспечить более надежное прогнозирование поведения грунтовых оснований в сложных климатических условиях Казахстана.

4. Результаты

4.1 Гранулометрический состав

Гранулометрический состав является фундаментальным свойством, определяющим потенциальную предрасположенность грунта к морозному пучению. Интенсивное пучение в наибольшей степени присуще тонкозернистым грунтам: пылеватым пескам, супесям, суглинкам и глинам. Физическая причина кроется в размере порового пространства: тонкие капилляры обеспечивают высокую высоту капиллярного поднятия и формируют развитую систему пленочной воды, которая сохраняет подвижность даже при отрицательных температурах и мигрирует к фронту промерзания. Напротив, крупнообломочные породы, гравий и чистые крупные пески с преобладанием частиц более 0,1 мм обладают крупными порами, вода в которых замерзает практически мгновенно, блокируя пути миграции, поэтому такие грунты относятся к непучинистым. Исследования Fladvad и др. [20] убедительно доказали, что процентное содержание тонкопылеватых и глинистых частиц (размером менее 0,02 мм) является наиболее надежным гранулометрическим индикатором морозной пучинистости минеральных грунтов.

4.2 Влажность грунта

Степень морозного пучения демонстрирует выраженную нелинейную зависимость от начальной влажности массива. При влажности грунта ниже предела усадки (когда вода присутствует лишь в виде прочносвязанной пленки) процессы миграции крайне затруднены, и деформации пучения минимальны. Оптимальные условия для экстремального сегрегационного льдообразования возникают в диапазоне влажностей, близких к пределу раскатывания (пластичности), когда в порах присутствует достаточное количество рыхлосвязанной и свободной капиллярной влаги. Важным открытием последних лет стали работы Чеверева [13], в которых экспериментально установлено, что даже значительное снижение влажности в талой зоне (вплоть до нижнего предела пластичности) не приводит к прекращению процесса пучения, если система остается гидродинамически открытой и обеспечен капиллярный подток воды снизу.

В целях углубленного анализа положений, изложенных в работах Чеверева [13], были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение процессов морозного пучения в глинистых грунтах различного гранулометрического состава.



Рисунок 1. Расположение пучения грунта в промерзающем образце с влажностью промерзания без внешней нагрузки [материал автора]

Для достижения поставленной цели в качестве объектов исследования были выбраны типичные разновидности мелкодисперсных грунтов, широко распространённых в дорожном строительстве, а именно: супесь пылеватая и суглинок лёгкий. Данные грунты

характеризуются различной степенью водоудерживающей способности, которые приведены на рисунке 1. Пористости и капиллярной активности, что позволяет комплексно оценить условия развития пучинообразования.

В ходе лабораторных испытаний моделировались условия отрицательных температур с контролируемым водонасыщением образцов. Особое внимание уделялось фазовому состоянию влаги в порах грунта. Результаты экспериментов показали, что интенсивное морозное пучение развивается при наличии в поровом пространстве достаточного количества рыхлосвязанной и свободной капиллярной влаги. Установлено, что именно эта форма влаги обладает высокой подвижностью и способностью к миграции в зону промерзания, где происходит её кристаллизация с образованием ледяных линз.

Таким образом, полученные данные подтверждают ключевые положения теории морозного пучения, согласно которой решающим фактором является не только общее содержание влаги в грунте, но и структурно-фазовое состояние. Наличие капиллярно-связанной влаги обеспечивает непрерывный приток воды к фронту замерзания, что приводит к увеличению объёма грунта и развитию деформаций, опасных для конструкций дорожной одежды.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке мероприятий по снижению пучинообразования, включая регулирование водного режима грунтов, применение дренажных систем и использование непучинистых материалов в основаниях автомобильных дорог.

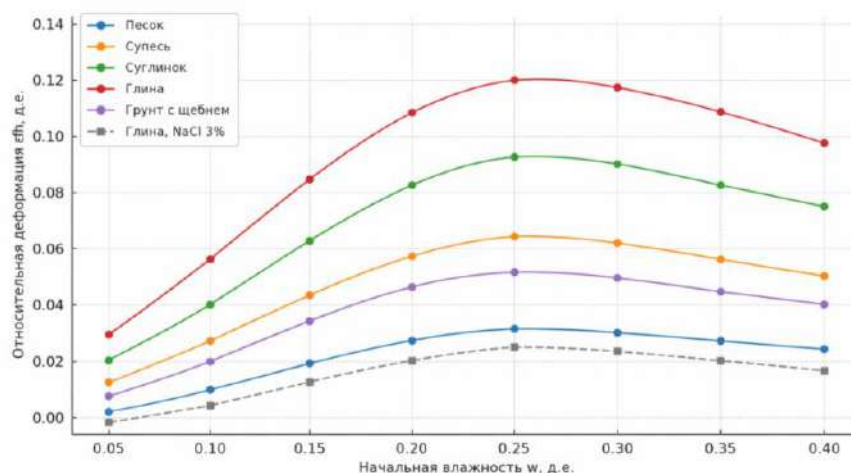


Рисунок 2. Зависимость относительной деформации морозного пучения ε_p от начальной влажности грунта (по обобщённым литературным данным) [материал автора]

$$y = 0,12 \cdot \frac{x}{W_p} \cdot e^{-\frac{x}{1,2 \cdot W_p}}, \quad (1)$$

где: ε_p — относительная деформация морозного пучения; w — начальная влажность; w_p — предел пластичности.

Зависимость носит нелинейный характер: при увеличении влажности от предела усадки до значений, близких к пределу пластичности, наблюдается интенсивный рост деформаций пучения. При дальнейшем увеличении влажности эффект стабилизируется или снижается вследствие уменьшения градиента капиллярного давления и изменения условий миграции влаги.

4.3 Температурный режим

Скорость продвижения фронта промерзания, определяемая температурным градиентом, критически влияет на формирующуюся структуру льда и итоговую величину деформаций поверхности. При малых градиентах температур и, соответственно, медленном

промерзании, мигрирующая влага успевает достичь границы фазового перехода. В таких условиях формируются мощные, хорошо выраженные шлиры и крупные ледяные линзы (сегрегационное льдообразование), что приводит к максимальному подъему грунта. Напротив, при шоковом, быстром замораживании влага замерзает в порах на месте, не успевая перераспределиться (формируется массивная криогенная текстура, мелкокристаллический цементный лед), и пучение сводится лишь к 9% объемному расширению локальной воды. Исследования М.С. Желнина и соавторов [26] показали, что современные математические модели, учитывающие сопряженный теплоперенос и фильтрацию влаги, с высокой точностью воспроизводят эти лабораторные закономерности именно при умеренных скоростях промерзания, характерных для реальных природных условий.

4.4 Засоление грунта

Химический состав порового раствора оказывает мощное термодинамическое воздействие на процесс льдообразования. Присутствие растворимых солей снижает температуру замерзания влаги (эффект криоскопической депрессии) и изменяет толщину пленки незамерзшей воды. В новейшем исследовании К.Е. Москвина с соавторами [27] на базе обширных лабораторных экспериментов было доказано, что искусственное засоление суглинистого грунта раствором хлорида натрия (NaCl) радикально снижает его пучинистость. При промораживании образцов при температуре $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ деформация засоленного грунта оказалась ниже в 2,3 раза по сравнению с пресным аналогом. При более низких температурах эффект сохраняется, хотя и несколько ослабевает: при $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ пучение снизилось в 1,51 раза, при $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ — в 1,57 раза. Этот механизм объясняется тем, что соль поддерживает значительную часть воды в незамерзшем состоянии при отрицательных температурах, кардинально уменьшая объем сегрегационного льда.

4.5 Внешняя нагрузка

Наличие внешней механической нагрузки (пригрузки) на промерзающий массив является мощнейшим фактором, способным подавить морозное пучение. Внешнее давление уплотняет грунт, уменьшает пористость и, что наиболее важно, противодействует расклинивающему давлению кристаллизующегося льда, подавляя миграцию воды. По экспериментальным данным Чеверева и коллег [13], по мере увеличения сжимающих напряжений интенсивность роста ледяных линз падает. При достижении предельной величины, когда внешняя нагрузка полностью уравнивает максимальное давление морозного пучения, характерное для данного типа грунта, деформации подъема полностью прекращаются. Этот физический эффект широко используется инженерами при расчете конструктивных решений: тяжелые здания с глубоким заложением фундаментов подвержены пучению в значительно меньшей степени, чем легкие малоэтажные постройки.

4.6 Взаимодействие грунта с конструкциями

Сложность проблемы пучения многократно возрастает, когда промерзающий грунт взаимодействует с элементами строительных конструкций, в частности со свайными фундаментами. Силы смерзания вызывают возникновение касательных напряжений по боковой поверхности свай (выпучивание). В масштабном лабораторном модельном тесте Tang и соавторы [22] исследовали восемь армированных бетонных свай в условиях циклического промерзания и оттаивания. Были зафиксированы значительные деформации подъема свай в зимний период (из-за касательных сил морозного пучения) и последующие резкие осадки при весеннем оттаивании. Эти результаты подчеркивают принципиальное значение лабораторного моделирования системы «грунт – сооружение» для разработки эффективных противопучинистых мероприятий (смазок, оболочек, анкеровки).

На основе обобщения в действующей нормативной базе установлено, что относительная деформация морозного пучения $\varepsilon_{\text{п}}$ изменяется в широком диапазоне:

- для песков: $\varepsilon_{\text{п}} < 0,01$
- для супесей: $\varepsilon_{\text{п}} = 0,01\text{--}0,05$

- для суглинков: $\varepsilon_{fh} = 0,05-0,12$
- для глин: $\varepsilon_{fh} > 0,10$

При этом увеличение начальной влажности от предела усадки до предела пластичности может приводить к росту деформаций в 2–4 раза, а повышение внешнего давления — к их снижению вплоть до полного подавления пучения.

5. Обсуждение

Сравнительный анализ современных экспериментальных методов показывает, что выбор схемы лабораторного промораживания критически влияет на получаемые результаты [13]. Традиционная схема промерзания сверху, заложенная в большинстве нормативных документов, хорошо имитирует природные условия, однако страдает от паразитных эффектов смерзания грунта со стенками обоймы, что занижает истинную величину ε_{fh} . Использование фторопластовых смазок и секционных обойм лишь частично решает эту проблему. В этом контексте метод промерзания снизу вверх, несмотря на кажущуюся противоестественность, обеспечивает более «чистый» с позиций физики механики грунтов результат для определения потенциальной пучинистости, исключая боковое сопротивление [16].

Полученная зависимость подтверждает, что влажность является одним из ключевых управляющих параметров процесса морозного пучения. Наличие экстремума свидетельствует о том, что максимальные деформации реализуются при оптимальном соотношении свободной и связанной влаги. Это согласуется с экспериментальными данными [11, 18] и подтверждает необходимость учёта нелинейного характера влияния влажности при инженерных расчётах.

Таблица 4. Систематизация и сравнительная оценка теоретических, экспериментальных и нормативных подходов к исследованию морозного пучения грунтов

Автор / школа	Преимущества	Ограничения	Лаборатория	Полевые условия	Область применения
Taber [5]	фундаментальная теория	нет количественных моделей	+	-	теория
Fladvad [20]	практичность	упрощения	+	+	фундаменты
Zeinali [21]	точные данные	масштабный эффект	++	-	лаборатория
Чеве́рев [13]	комплексный подход	сложность	++	+	наука
Желнин (модели) [26]	высокая точность	сложность	++	+	прогноз
ГОСТ, СП [12,16]	простота	низкая точность	+	++	проектирование

Проведённый анализ показывает, что ни один из существующих подходов не является универсальным. Классические теории обеспечивают физическую основу процесса, лабораторные исследования дают количественные зависимости, а нормативные методы позволяют применять результаты на практике. Однако ключевой проблемой остаётся несоответствие лабораторных и полевых условий, что требует разработки интегрированных моделей, учитывающих реальный водный режим, температурные градиенты и масштабный эффект.

Важной научной проблемой остается масштабный эффект при переносе результатов лабораторных тестов на реальные строительные объекты. В природе процесс сезонного промерзания длится месяцами, температурные градиенты невелики, а фронт промерзания продвигается со скоростью миллиметры в сутки. В лаборатории, в целях экономии времени

(согласно ГОСТ 28622-2012 [12], опыт длится от нескольких суток до недели), градиенты искусственно завышаются. Это может приводить к смещению баланса от сегрегационного льдообразования (медленного) к поровому (быстрому), потенциально искажая прогнозные величины. Поэтому верификация данных на полевых полигонах остается обязательным этапом серьезных инженерных изысканий.

Аналогичные процессы подтверждаются полевыми наблюдениями для дорожных оснований в условиях Казахстана, где за счёт паропереноса в зимний период возможно увеличение влажности грунта более чем на 20-30%, что приводит к существенному снижению несущей способности при оттаивании [28].

Лабораторные исследования сегодня приобрели новую фундаментальную роль — они служат базисом для калибровки сложных численных моделей. Современная вычислительная геотехника опирается на ТГМ-моделирование (thermo-hydro-mechanical), описывающее связанные процессы теплопереноса, фильтрации и механики сплошной среды. Без надежных лабораторных данных о теплопроводности, проницаемости незамерзшей влаги и параметрах криогенной контракции, получаемых в экспериментах, такие математические модели становятся неработоспособными.

Анализируя перспективы развития методологии, следует отметить мощный потенциал интеграции неразрушающих методов контроля (таких как рентгеновская микро-КТ) непосредственно в криокамеры. Это позволит визуализировать кинетику роста ледяных линз, не прерывая опыт. Другим прорывным направлением становится применение алгоритмов машинного обучения: на основе накопленных баз данных лабораторных испытаний (включающих гранулометрию, пластичность, плотность) создаются нейросетевые модели, способные с высокой точностью прогнозировать степень пучинистости без проведения длительных прямых морозильных тестов. Наконец, острой необходимостью является дальнейшая гармонизация и международная стандартизация протоколов испытаний, что позволит объединить усилия исследователей из Казахстана, России, Канады, Скандинавии и Китая [20-26,29].

Существенным результатом проведённого анализа является выявление противоречия между лабораторными и натурными условиями промерзания. В лаборатории скорость продвижения фронта промерзания на порядки выше, чем в природных условиях, что приводит к смещению механизма льдообразования от сегрегационного к поровому. Это обстоятельство требует введения корректирующих коэффициентов при использовании лабораторных данных в инженерных расчётах, что в настоящее время недостаточно отражено в нормативной базе.

5. Заключение

Проведенный анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что морозное пучение представляет собой сложный термогидромеханический процесс, определяемый совместным воздействием гранулометрического состава, влажности, температурного режима, гидродинамических условий и внешнего напряженного состояния. Несмотря на более чем столетнюю историю изучения данного явления, проблема количественного прогнозирования деформаций морозного пучения остается актуальной вследствие многофакторного характера процесса и различий между лабораторными и натурными условиями промерзания.

Установлено, что лабораторные методы исследования продолжают оставаться наиболее надежным инструментом изучения процессов криогенного деформирования грунтов. Современные экспериментальные установки позволяют осуществлять непрерывный контроль температурных, деформационных и гидравлических параметров, обеспечивая получение достоверных данных, необходимых для инженерной оценки пучинистости грунтов и калибровки численных моделей. При этом развитие автоматизированных систем регистрации, а также применение методов рентгеновской

микротомографии и ЯМР-томографии существенно расширяют возможности изучения внутренней структуры промерзающего массива и механизмов формирования ледяных линз.

Показано, что выбор схемы лабораторного эксперимента должен определяться гидрогеологическими условиями объекта и поставленными исследовательскими задачами. Закрытая система целесообразна для сравнительной оценки свойств грунтов и определения базовых деформационных характеристик в условиях ограниченного влагосодержания, тогда как открытая система наиболее полно воспроизводит реальные условия эксплуатации водонасыщенных оснований и позволяет фиксировать максимальные деформации, обусловленные криогенной миграцией влаги. Использование различных направлений промерзания и сочетание открытых и закрытых систем позволяют повысить достоверность результатов и расширить возможности экспериментального моделирования.

Анализ литературных данных показал, что определяющими факторами морозного пучения для условий Казахстана являются гранулометрический состав грунта, содержание тонкодисперсных частиц размером менее 0,02 мм, начальная и изменяющаяся во времени влажность, температурный градиент, условия водообмена и уровень внешних нагрузок. Установлено, что игнорирование взаимосвязанного влияния указанных факторов приводит к существенным погрешностям при прогнозировании деформаций и может стать причиной преждевременной деградации дорожных конструкций и фундаментов сооружений.

Проведенный обзор также показал перспективность применения методов инженерной мелиорации, в частности искусственного засоления грунтов, позволяющего снижать интенсивность морозного пучения за счет криоскопического эффекта. Одновременно наиболее перспективным направлением развития экспериментального мерзлотоведения является интеграция высокоточных лабораторных измерений с современными методами внутренней визуализации и термогидромеханическим моделированием.

Для повышения надежности инженерных решений рекомендуется применение комплексного подхода, включающего лабораторные исследования по различным схемам промораживания с последующей верификацией результатов по данным натурных наблюдений. Особое значение при этом имеет учет сезонной динамики влагопереноса, включая перенос влаги в парообразном состоянии, глубины сезонного промерзания и условий капиллярного поднятия воды. Такой подход позволяет формировать физически обоснованные расчетные модели и повышать достоверность прогнозирования долговечности оснований и дорожных конструкций.

Лабораторные исследования морозного пучения являются необходимой научной и практической основой для совершенствования методов инженерно-геологических изысканий и обеспечения надежного проектирования фундаментов, автомобильных дорог, насыпей и других объектов транспортной инфраструктуры в районах сезонного промерзания. Полученные результаты и обобщенные зависимости могут быть использованы при оценке пучинистости грунтов и выборе эффективных конструктивных решений в условиях Казахстана и других регионов с аналогичными климатическими условиями.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Жуандыков Н., Сарсембаева А., Дабска А. Исследования морозного пучения в лабораторных экспериментах // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyryn Khabarshysy. 2026; 2 (14), 19-37. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-05>

Cite this article as: Zhuandykov N., Sarsembaeva A., Dabska A. Issledovaniya moroznogo pucheniya v laboratornykh eksperimentakh [Investigation of frost heave in laboratory experiments: methods, equipment, and influencing factors]. Vestnik Kazhskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyryn Khabarshysy. 2026; 2 (14), 19-37. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-05>

Литература

1. Lu, B., Zhao, W., Li, S., Dong, M., Xia, Z., & Shi, Y. (2024). Study on Seasonal Permafrost Roadbed Deformation Based on Water-Heat Coupling Characteristics. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14092710>
2. Mussakhanova, S., Sarsembayeva, A., Zhussupbekov, A., & Collins, P. (2024). Calculation and numerical modeling of the effect of heat and mass transfer on the properties of pile foundations in seasonally freezing soils. *Technobius*. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.1.2024.0054>
3. Wang, Z., Fu, S.-R., Zhao, X., Jiang, W., Liu, G., Li, D., & Qi, H. (2023). Modeling temperature change and water migration of unsaturated soils under seasonal freezing-thawing conditions. *Cold Regions Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104074>
4. Li, Z., Jiang, R., Tang, A., & Zhu, R. (2024). Heat-water-stress Coupling Model for Saturated Frozen Soil under Different Stress Levels. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28, 4897 - 4910. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1698-8>
5. Taber, S. (1930). The Mechanics of Frost Heaving. *The Journal of Geology*, 38, 303 - 317. <https://doi.org/10.1086/623720>
6. Peppin, S., & Style, R. (2013). The Physics of Frost Heave and Ice-Lens Growth. *Vadose Zone Journal*, 12. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0049>
7. Konrad, J., & Morgenstern, N. (1981). The segregation potential of a freezing soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 18, 482-491. <https://doi.org/10.1139/t81-059>
8. Wang, Z., Teng, J., Nishimura, S., Zhang, S., & Sheng, D. (2025). Numerical Modelling Ice Lens Formation and Frost Heave in Unsaturated Soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 50, 121 - 136. <https://doi.org/10.1002/nag.70091>
9. Fu, Z., Wu, Q., Zhang, W., He, H., & Wang, L. (2022). Water Migration and Segregated Ice Formation in Frozen Ground: Current Advances and Future Perspectives. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.826961>
10. Korshunov, A., Churkin, S., & Nevzorov, A. (2020). The innovative laboratory equipment for assessment of a frost heave phenomenon of the soils. *Construction and Geotechnics*. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.4.01>
11. Zhang, H., Wang, K., Zheng, B., Lu, M., Chen, Z., Xing, L., Hu, J., Zhao, J., Shi, L., & Wen, C. (2026). Effects of temperature and water supply conditions on the hydro-thermal properties of sandy silty clay: evidence from unidirectional freezing tests. *Research in Cold and Arid Regions*. <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2026.01.003>
12. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. (2012). *GOST 28622-2012: Soils—Laboratory method for determination of frost susceptibility* [in Russian]. Retrieved March 25, 2026, from <https://meganorm.ru/Data2/1/4293782/4293782249.pdf>
13. Cheverev V.G., Safronov E.V., Alekseev A.G., Grechishcheva E.S., 2022. Laboratory methods for determining the thermophysical characteristics of frozen and thawed soils: analytical review. *Engineering Geology World*, Vol. XVII, No. 1, pp. 64–72, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-1-64-72>.
14. Chernysheva, I., & Mashchenko, A. (2016). On the issue of using various methods of protection against frost heave. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*, 7, 39-46. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.1.05>
15. Basharin, A. D., Churilin, V., Sukhorukov, A., & Badina, M. (2025). Laboratory Tests of Soil Frost Heaving. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291>

16. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. (2020). *GOST 25100-2020: Soils—Classification* [in Russian]. Retrieved March 25, 2026, from https://prg.kz/document/?doc_id=33484524
17. Roustaei, M., & Hendry, M. (2023). Frost Action in Canadian Railways: A Review of Assessment and Treatment Methods. *Journal of Cold Regions Engineering*. <https://doi.org/10.1061/jcrgei.creng-668>
18. Chen, L., & Zhang, X. (2024). A Quasi-Steady Model for Estimating the Rate of Frost Heave When Subjected to Overburden Pressure. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w16172542>
19. Haosong, H. E., Teng, J., Zhao, S., Guan, W., & Zhang, S. (2024). Comparative evaluation of the methods of assessing frost heave susceptibility. *Cold Regions Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104406>
20. Fladvad, M., & Erlingsson, S. (2021). Modelling the response of large-size subbase materials tested under varying moisture conditions in a heavy vehicle simulator. *Road Materials and Pavement Design*, 23, 1107 - 1128. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1883462>
21. Zeinali, A., Edeskär, T., & Laue, J. (2020). Mechanism of thawing. *Cogent Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1716438>
22. Tang, L., Yang, L., Wang, X., Yang, G., Ren, X., Li, Z., & Li, G.-Y. (2021). Numerical analysis of frost heave and thawing settlement of the pile–soil system in degraded permafrost region. *Environmental Earth Sciences*, 80. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09999-4>
23. Zhelnin, M., Kostina, A., Prokhorov, A., Plekhov, O., Semin, M., & Levin, L. (2021). Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of frost heave and water migration during artificial freezing of soils for mineshaft sinking. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.015>
24. Hu, K., Zhou, G., Liu, J., Wu, Y., & Wang, S. (2025). Numerical Study on a Frost Heave Model Considering the Critical Separation Pressure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 49, 3713 - 3730. <https://doi.org/10.1002/nag.70040>
25. Meng-Ya, Z., Hong-Yi, L., Li-Dong, Y., Xing-Zhou, L., Zi-Hao, W., & Tang-Dai, X. (2023). Experimental study on horizontal frost heave force on open-cut tunnels in seasonal frozen regions. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1022058>
26. Zhelnin, M. S., Prokhorov, A. E., Kostina, A. A., & Plekhov, O. A. (2019). Experimental and theoretical study of mechanical deformations in freezing water-saturated soil [in Russian]. *Perm University Herald. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 46(3), 52–63. <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2019-3-52-63>
27. Moskvina, K. E., Moskvina, E. A., Grigoriev, B. V., & Elina, E. I. (2025). Investigation of frost heave of loamy soil depending on the degree of its salinity with NaCl solution [in Russian]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 336(8), 234–242. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/8/4665>
28. Teltayev, B., Rossi, O. C., Aitbayev, K., Suppes, E., Yelshibayev, A., & Nugmanova, A. (2022). Freezing and Thawing Processes of Highways in Kazakhstan. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app122311938>

References

1. Lu, B., Zhao, W., Li, S., Dong, M., Xia, Z., & Shi, Y. (2024). Study on Seasonal Permafrost Roadbed Deformation Based on Water–Heat Coupling Characteristics. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14092710>
2. Mussakhanova, S., Sarsembayeva, A., Zhussupbekov, A., & Collins, P. (2024). Calculation and numerical modeling of the effect of heat and mass transfer on the properties of pile foundations in seasonally freezing soils. *Technobius*. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.1.2024.0054>
3. Wang, Z., Fu, S.-R., Zhao, X., Jiang, W., Liu, G., Li, D., & Qi, H. (2023). Modeling temperature change and water migration of unsaturated soils under seasonal freezing-thawing

- conditions. *Cold Regions Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104074>
4. Li, Z., Jiang, R., Tang, A., & Zhu, R. (2024). Heat-water-stress Coupling Model for Saturated Frozen Soil under Different Stress Levels. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28, 4897 - 4910. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1698-8>
 5. Taber, S. (1930). The Mechanics of Frost Heaving. *The Journal of Geology*, 38, 303 - 317. <https://doi.org/10.1086/623720>
 6. Peppin, S., & Style, R. (2013). The Physics of Frost Heave and Ice-Lens Growth. *Vadose Zone Journal*, 12. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0049>
 7. Konrad, J., & Morgenstern, N. (1981). The segregation potential of a freezing soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 18, 482-491. <https://doi.org/10.1139/t81-059>
 8. Wang, Z., Teng, J., Nishimura, S., Zhang, S., & Sheng, D. (2025). Numerical Modelling Ice Lens Formation and Frost Heave in Unsaturated Soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 50, 121 - 136. <https://doi.org/10.1002/nag.70091>
 9. Fu, Z., Wu, Q., Zhang, W., He, H., & Wang, L. (2022). Water Migration and Segregated Ice Formation in Frozen Ground: Current Advances and Future Perspectives. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.826961>
 10. Korshunov, A., Churkin, S., & Nevzorov, A. (2020). The innovative laboratory equipment for assessment of a frost heave phenomenon of the soils. *Construction and Geotechnics*. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.4.01>
 11. Zhang, H., Wang, K., Zheng, B., Lu, M., Chen, Z., Xing, L., Hu, J., Zhao, J., Shi, L., & Wen, C. (2026). Effects of temperature and water supply conditions on the hydro-thermal properties of sandy silty clay: evidence from unidirectional freezing tests. *Research in Cold and Arid Regions*. <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2026.01.003>
 12. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. (2012). *GOST 28622-2012: Soils—Laboratory method for determination of frost susceptibility* [in Russian]. Retrieved March 25, 2026, from <https://megainorm.ru/Data2/1/4293782/4293782249.pdf>
 13. Cheverev V.G., Safronov E.V., Alekseev A.G., Grechishcheva E.S., 2022. Laboratory methods for determining the thermophysical characteristics of frozen and thawed soils: analytical review. *Engineering Geology World*, Vol. XVII, No. 1, pp. 64–72, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-1-64-72>.
 14. Chernysheva, I., & Mashchenko, A. (2016). On the issue of using various methods of protection against frost heave. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*, 7, 39-46. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.1.05>
 15. Basharin, A. D., Churilin, V., Sukhorukov, A., & Badina, M. (2025). Laboratory Tests of Soil Frost Heaving. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291>
 16. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. (2020). *GOST 25100-2020: Soils—Classification* [in Russian]. Retrieved March 25, 2026, from https://prg.kz/document/?doc_id=33484524
 17. Roustaei, M., & Hendry, M. (2023). Frost Action in Canadian Railways: A Review of Assessment and Treatment Methods. *Journal of Cold Regions Engineering*. <https://doi.org/10.1061/jcrgei.creng-668>
 18. Chen, L., & Zhang, X. (2024). A Quasi-Steady Model for Estimating the Rate of Frost Heave When Subjected to Overburden Pressure. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w16172542>
 19. Haosong, H. E., Teng, J., Zhao, S., Guan, W., & Zhang, S. (2024). Comparative evaluation of the methods of assessing frost heave susceptibility. *Cold Regions Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104406>

20. Fladvad, M., & Erlingsson, S. (2021). Modelling the response of large-size subbase materials tested under varying moisture conditions in a heavy vehicle simulator. *Road Materials and Pavement Design*, 23, 1107 - 1128. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1883462>
21. Zeinali, A., Edeskär, T., & Laue, J. (2020). Mechanism of thawing. *Cogent Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1716438>
22. Tang, L., Yang, L., Wang, X., Yang, G., Ren, X., Li, Z., & Li, G.-Y. (2021). Numerical analysis of frost heave and thawing settlement of the pile–soil system in degraded permafrost region. *Environmental Earth Sciences*, 80. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09999-4>
23. Zhelnin, M., Kostina, A., Prokhorov, A., Plekhov, O., Semin, M., & Levin, L. (2021). Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of frost heave and water migration during artificial freezing of soils for mineshaft sinking. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.015>
24. Hu, K., Zhou, G., Liu, J., Wu, Y., & Wang, S. (2025). Numerical Study on a Frost Heave Model Considering the Critical Separation Pressure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 49, 3713 - 3730. <https://doi.org/10.1002/nag.70040>
25. Meng-Ya, Z., Hong-Yi, L., Li-Dong, Y., Xing-Zhou, L., Zi-Hao, W., & Tang-Dai, X. (2023). Experimental study on horizontal frost heave force on open-cut tunnels in seasonal frozen regions. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1022058>
26. Zhelnin, M. S., Prokhorov, A. E., Kostina, A. A., & Plekhov, O. A. (2019). Experimental and theoretical study of mechanical deformations in freezing water-saturated soil [in Russian]. *Perm University Herald. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 46(3), 52–63. <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2019-3-52-63>
27. Moskvina, K. E., Moskvina, E. A., Grigoriev, B. V., & Elina, E. I. (2025). Investigation of frost heave of loamy soil depending on the degree of its salinity with NaCl solution [in Russian]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 336(8), 234–242. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/8/4665>
28. Teltayev, B., Rossi, O. C., Aitbayev, K., Suppes, E., Yelshibayev, A., & Nugmanova, A. (2022). Freezing and Thawing Processes of Highways in Kazakhstan. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app122311938>

RETRACTED