



ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ОСАДОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАСЫПЕЙ НА ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТАХ

Поступила 6.02.2026

Принята к публикации 25.04.2026

Опубликована 11.06.2026

ВАВРИНЮК Т.С.

Инженер-геотехник ООО «НИП-Информатика», г. Санкт-Петербург, Россия
sio@nipinfor.ru

ФЕДОРЕНКО Е.В.

Научный консультант ООО «НИП-Информатика», г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается решение по оптимизации проектирования земляного полотна транспортных сооружений на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов. Автоматизация выполнения расчетов тепловых осадков под насыпями путем численного моделирования позволяет ускорить ввод данных за счет использования командной строки и выполнения расчетов для большого количества расчетных сечений. Тепловая осадка условно разделяется на осадку за счет изменения объема при таянии льда (осадка оттаивания) и осадку уплотнения под нагрузкой и определяется как сумма этих двух составляющих.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

многолетнемерзлые грунты; оттаивающие грунты; земляное полотно; тепловая осадка; численное моделирование; метод конечных элементов; оптимизация расчетов.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вавринюк Т.С., Федоренко Е.В. Оптимизация расчетов осадок при проектировании насыпей на оттаивающих грунтах // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 1. С. 40–47. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-40-47.

OPTIMIZATION OF SETTLEMENT CALCULATIONS IN THE DESIGN OF EMBANKMENTS ON THAWING SOILS

Received: 6.02.2026

Accepted for publication 25.04.2026

Published 11.06.2026

VAVRINYUK T.S.

Geotechnical engineer at NIP-Informatika LLC, Saint Petersburg, Russia
sio@nipinfor.ru

FEDORENKO E.V.

Scientific consultant at NIP-Informatika LLC, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

The article considers a solution for optimizing the design of transport infrastructure subgrades in permafrost areas. Automation of calculating thermal settlements under embankments using numerical modeling speeds up data entry through the use of a command-line interface and of calculations for a large number of cross-sections. Thermal settlement is conventionally divided into settlement due to volume change during ice thawing (thaw settlement) and compaction settlement under load, and is determined as the sum of these two components.

KEYWORDS:

permafrost soils; thawing soils; subgrade; thermal settlement; numerical modeling; finite element method; optimization of calculations.

FOR CITATION:

Vavrinyuk T.S., Fedorenko E.V. Optimizatsiya raschetov osadok pri proektirovanii nasypei na ottaivayushchikh gruntakh [Optimization of settlement calculations in the design of embankments on thawing soils] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 1. S. 40–47. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-40-47 (in Rus.).

Введение

В условиях меняющегося климата особенно остро стоит вопрос обеспечения надежности земляного полотна на оттаивающем основании. Опыт проектирования участков Байкало-Амурской магистрали (БАМ) с 2020 года показывает, что во многих районах, где ранее была зафиксирована сплошная или островная мерзлота, теперь ее нет. Это обстоятельство требует практически повсеместного проектирования по второму принципу. Следовательно, возникает необходимость прогнозирования деформаций многолетнемерзлых грунтов при их оттаивании. Расчет тепловой осадки под насыпями стандартным методом, описанным в СП 25.13330.2020, может быть выполнен в программе численного моделирования SiO 2D как в одномерной, так и в двухмерной постановке. Инструментарий программы позволяет задействовать командную строку для автоматизации и сокращения времени на выполнение расчетов. Для проверки реализации данного типа расчетов результаты, полученные в программе, сравниваются с соответствующими значениями, вычисленными вручную по СП 25.13330.2020.

Проблема проектирования земляного полотна в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов

Обзор состояния земляного полотна БАМ по прошествии десятилетий после строительства, анализ ситуации и примеры решений приведены в статье [1]. Ее авторы отмечают, что проблемы деформаций земляного полотна все еще актуальны. Одной из причин является увеличение осевых нагрузок и обращение поездов увеличенной массы.

Аналогичное мнение высказывают авторы статьи [2] – о том, что в зоне залегания высокотемпературных грунтов под основанием земляного полотна образуются чаши протаивания глубиной более 2 м, несмотря на применение первого принципа при сооружении земляного полотна. Для выполнения прогноза и решения теплофизических задач разработана программа Freeze-Cold, с помощью которой в этом исследовании сделана попытка учесть влияние инфильтрации воды на изменение теплопроводности для подтверждения факта деградации кровли мерзлоты.

При проектировании земляного полотна требуется выполнить расчетное обоснование принятых решений, для чего проводят

теплотехнические и геотехнические расчеты. Основными проблемами являются получение исходных данных и совместные теплотехнические и деформационные расчеты. В статье [3] уделяется внимание исходным данным для программ, позволяющих производить расчеты осадок сооружений. В этой работе выделены два методических подхода к компрессионным испытаниям в зависимости от условий оттаивания:

1) плоскопараллельный – наиболее соответствующий естественному процессу оттаивания для условий одномерной задачи;

2) всесторонний – предполагающий допущение всестороннего оттаивания, но при этом более практичный.

По результатам экспериментальных исследований, осадка при всестороннем оттаивании на 5–20% больше, чем при плоскопараллельном. Наибольшая разница характерна для суглинки, а для песка условия оттаивания практически не влияют на значения осадок. Отличия обусловлены неравномерностью распределения напряжений в грунте в процессе оттаивания и влиянием мерзлого ядра, что было установлено экспериментально и подтверждено численным моделированием [3].

Как отмечает в своей статье [4] С.А. Кудрявцев, сложные задачи совместного теплофизического расчета и установления напряженно-деформированного состояния (НДС) в массиве не могут быть решены аналитически. В указанной работе подчеркивается, что аналитическая расчетная оценка НДС для случая «промерзание – оттаивание грунта» затруднена даже при одномерном действии процессов. Для двух- и трехмерных задач, особенно при совместном расчете системы «промерзающее (оттаивающее) основание – сооружение», необходимость применения численных методов является очевидной. Программа Termoground, разработанная С.А. Кудрявцевым, И.И. Сахаровым и В.Н. Пармоновым для выполнения совместных расчетов, не является коммерческим продуктом и недоступна для проектных организаций. Стоит отметить, что использование этой программы требует высокой квалификации пользователя – возможно, поэтому расчеты в ней производят только автор исследования [4] и его коллеги.

Решение, выполненное в работе [5], показало, что осадка оттаивающих грунтов с учетом динамического воздействия больше, чем при статическом нагружении. Авторы статьи [5], со ссылкой на ГОСТ 56353-2022, указывают, что модуль деформации, полученный в условиях динамического нагружения, на 35% больше, чем для условий статического испытания. А при расчете осадки используется динамический модуль деформации, полученный на основании методики И.В. Прокудина, который меньше, чем статический, что и приводит к увеличению значения осадки. Вероятно, на основе результатов испытаний следовало бы получать не динамический модуль деформации (E_d), а уменьшенное значение модуля деформации за счет

учета виброползучести (E_{red}). Но и в этом случае решение такой сложной задачи, как учет динамического воздействия поездов на оттаивающие грунты, не будет корректным. Во-первых, модуль деформации не является константой, а зависит от уровня напряжений, которые в основаниях насыпей изменяются по глубине. Во-вторых, по мере удаления от источника колебаний изменяется амплитуда и одно динамическое испытание не может обеспечить получение данных для всего грунтового основания.

В зарубежной практике используются сложные специальные модели грунтов. Например, в программном комплексе PLAXIS есть модель Frozen-and-unfrozen. Возможности модели позволяют решить смешанную термогидромеханическую задачу взаимодействия. Однако применение этой модели на практике является весьма непростым. Она требует большого набора данных для ее задания (25 параметров). При этом теоретические предпосылки, положенные в основу модели, существенно отличаются от принятых в отечественной практике. Например, эффективные напряжения вычисляются не по принципу К. Терцаги, а на основании теории неполностью водонасыщенного поведения грунтов по А. Бишопу. Для расчетов по этой теории необходимо задавать кривые водоудерживающей способности грунтов, получение которых не освещается в нормативных документах, да и в литературе на русском языке информации об этом практически нет. Теплофизические параметры грунта необходимо вводить для твердого компонента, а модель за счет использования данных о водонасыщении, заданных через кривую водоудерживающей способности, определит параметры для грунта в целом. Это означает, что ввод данных параметров грунта по СП 25.13330-2020 будет неправильным и приведет к ошибкам расчета [6, 7]. Таким образом, несмотря на теоретическую пригодность подобной модели для решения задач проектирования, ее практическое применение весьма затруднительно в связи с отсутствием теоретической базы на русском языке, отсутствием нормативных документов по определению исходных данных и сложностями работы пользовательской модели в программном комплексе (нет отладки, ошибки не задокументированы).

Доступным для практики проектирования решением остается отдельный расчет: сначала выполняется теплотехнический прогноз на заданное время, а затем осуществляется расчет НДС и тепловой осадки в соответствии с положениями нормативных документов.

Постановка задачи

Расчет тепловой осадки производится по СП 25.13330.2020 [8] путем послойного суммирования произведения мощности слоя и относительной деформации оттаивающего грунта.

При этом относительная деформация (δ_{th}) складывается из двух составляющих – коэффициента оттаивания (A_{th} , д. ед.), характеризующего относительную осадку грунта при оттаивании в условиях отсутствия внешней нагрузки, и деформации при уплотнении грунта после оттаивания, рассчитываемой с помощью коэффициента сжимаемости (m_{th} , кПа⁻¹). Соответственно, расчет тепловой осадки будет состоять из двух частей:

$$S_{th} = \sum_{i=1}^n (A_{th,i}) \cdot h_i + \sum_{i=1}^n (m_{th,i} \cdot \sigma_{zg,i}) \cdot h_i = \sum_{i=1}^n \delta_{th,i} \cdot h_i,$$

где n – число выделенных слоев грунта; h_i – толщина i -го слоя оттаивающего грунта, м; $A_{th,i}$ – коэффициент оттаивания, д. ед.; $m_{th,i}$ – коэффициент сжимаемости i -го слоя грунта, кПа⁻¹; $\sigma_{zg,i}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя грунта; $\delta_{th,i}$ – относительная деформация i -го слоя грунта, д. ед.

Указанные характеристики оттаивающих грунтов необходимо устанавливать по результатам полевых испытаний мерзлых грунтов горячим штампом или по данным лабораторных исследований по специально разработанной методике испытаний мерзлых грунтов при оттаивании в компрессионных условиях [9].

Для предварительных расчетов обычно используются обобщенные данные, накопленные за долгие годы для основных видов грунтов конкретного региона криолитозоны. Кроме того, многими исследователями были предложены корреляционные зависимости для расчетов тепловых осадок на основе физических свойств грунтов [10, 11, 12]. Однако все они являются приближенными и, как правило, ограничиваются определенным видом грунта. Это связано с тем, что осадки при оттаивании обусловлены многими факторами, не поддающимися количественному определению.

Вычисление тепловой осадки ручным способом занимает много времени, поскольку необходимо выполнять несколько расчетов – определение напряжений, вычисление первой части осадки из-за протаивания, вычисление второй части осадки из-за уплотнения (в том числе путем расчета консолидации) для каждого слоя. В реальных условиях проектирования такая задача весьма трудоемка. Наиболее перспективным и в то же время закрывающим текущую необходимость в получении результатов геотехнических расчетов является метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в российской программе SiO 2D [13].

Сегодня строительная отрасль ориентирована на цифровизацию, что достигается в первую очередь путем автоматизации процессов [14]. Применительно к рассматриваемой задаче автоматизация возможна. Для этого необходимо организовать получение исходных данных о геологическом строении по скважинам, положении кровли многолетнемерзлых

пород, мощности сезонно-талого слоя, высоте насыпи путем выгрузки из программ проектирования плана и профиля. Эти данные в виде цифр могут быть обработаны посредством электронных таблиц типа Excel и преобразованы в команды для создания расчетных схем в SiO 2D. Наиболее простым вариантом является расчет при постановке одномерной задачи в соответствии с теоретическими представлениями действующих нормативных документов из доцифровой эпохи. С помощью командной строки в программе будет построена расчетная схема по скважине, заданы уровень грунтовых вод (при его наличии) и высота насыпи. По имеющимся данным об изменении положения кровли многолетнемерзлых грунтов будет задана область протаивания.

С помощью команд создаются необходимые стадии вычислений и выполняется расчет, результатом которого являются величина тепловой осадки и, при необходимости, время консолидационного уплотнения талого слоя. Кроме того, последовательность команд может быть такой, что выполнение десятков и даже сотен расчетов для выбранных пикетов будет происходить автоматически, с записью полученных данных в память компьютера и сохранением каждого расчетного файла. После этого достаточно извлечь результаты и таким образом получить ведомость осадок по длине трассы.

Метод решения задачи

Для решения задачи требуется определить необходимые исходные данные и последовательность расчета. Сначала необходимо смоделировать исходное мерзлое состояние грунтов, после чего приложить нагрузку от веса насыпи (для варианта отсыпки в зимний период). Следующие стадии расчета позволят определить тепловую осадку. Величина относительной деформации от протаивания A_{th} задается в программе напрямую. Для этого используется специальная возможность задания относительной деформации каждому слою (рис. 1, б). Таким образом, каждый слой получит соответствующую осадку. Особенностью этого расчета является отсутствие зависимости от напряженного состояния.

На следующей стадии необходимо приложить собственный вес грунта с учетом взвешивающего воздействия воды. При необходимости задача может быть решена путем расчета консолидации, то есть с вычислением порового давления и времени его рассеивания, за которое будет реализована вторая часть осадки за счет уплотнения. Следует отметить, что решение такой задачи достаточно сложное. Оно описано в работе [15]. Эта стадия также имеет свою особенность: для корректного учета уже приложенных напряжений от веса насыпи необходимо задействовать специальную процедуру перераспределения напряжений в конечных элементах.

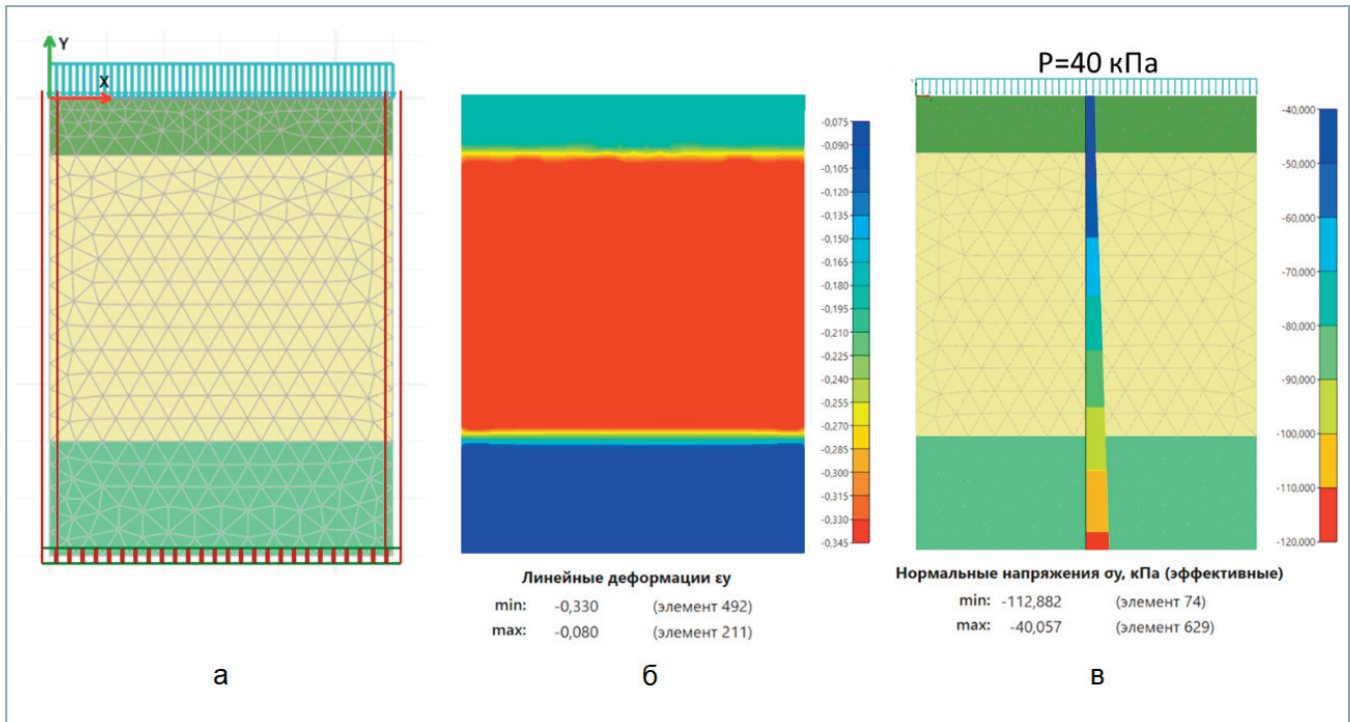


Рис. 1. Конечноэлементная модель в программе SiO 2D (а); заданный по слоям коэффициент оттаивания A_{th} (б); эпюра вертикальных напряжений от веса насыпи по глубине (в)

Таблица. Характеристики грунтов, слагающих рассматриваемый участок

Параметр	Торф	Суглинок	Песок
Удельный вес в естественном состоянии, кН/м^3	10	20	18
Естественная влажность (W_c), %	600	80	12
Коэффициент оттаивания (A_{th}), д. ед.	0,18	0,33	0,08
Относительная деформация при оттаивании (δ_{th}), д. ед.	0,40	0,38	0,085

Кроме того, решение задачи может быть выполнено в двухмерной постановке (для условий плоской деформации). При этом насыпь может быть задана как в виде трапециевидальной нагрузки (для строгого соответствия нормативным документам и возможности расчета несущей способности основания), так и в виде грунтового тела для расчета устойчивости, в том числе с учетом транспортной нагрузки.

Пример расчета тепловой осадки в одномерной постановке в программе SiO 2D

На восточном участке БАМ проектируется насыпь из гравийно-галечниковых грунтов высотой 2 м на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах по второму принципу. Грунтовый разрез основания представлен следующими грунтами: торф (мощностью 0,5 м); суглинок заторфованный (0,7 м); песок мелкий (1,5 м). Прогнозируемая на основе вы-

полненных теплотехнических расчетов глубина протаивания грунтов основания (h_{th}) составляет 4,0 м. Характеристики грунтов представлены в таблице.

Суммарная осадка грунтов основания в пределах прогнозируемой глубины протаивания при использовании данных таблицы и приведенной в настоящей статье формулы: $S_{th}=1,235$ м. Первая составляющая этой величины за счет осадки оттаивания: $S_{th}(A_{th})=0,995$ м. Вторая составляющая за счет осадки уплотнения: $S_{th}(m_{th})=0,240$ м.

На рисунке 1 показаны: расчетная схема, заданная величина относительной деформации от протаивания (A_{th}) и эпюра вертикальных напряжений в основании от веса насыпи.

При расчете осадки за счет уплотнения под весом грунта в качестве входного параметра в программе используется одометрический модуль деформации (E_{oed} , кПа), который рассчитывается в соответствии с величиной коэффициента сжимаемости m_{th} (как его обратная величина). Так, для суглинка $m_{th}=0,000714$ кПа^{-1} ; $E_{oed}=1/0,000714=1400$ кПа.

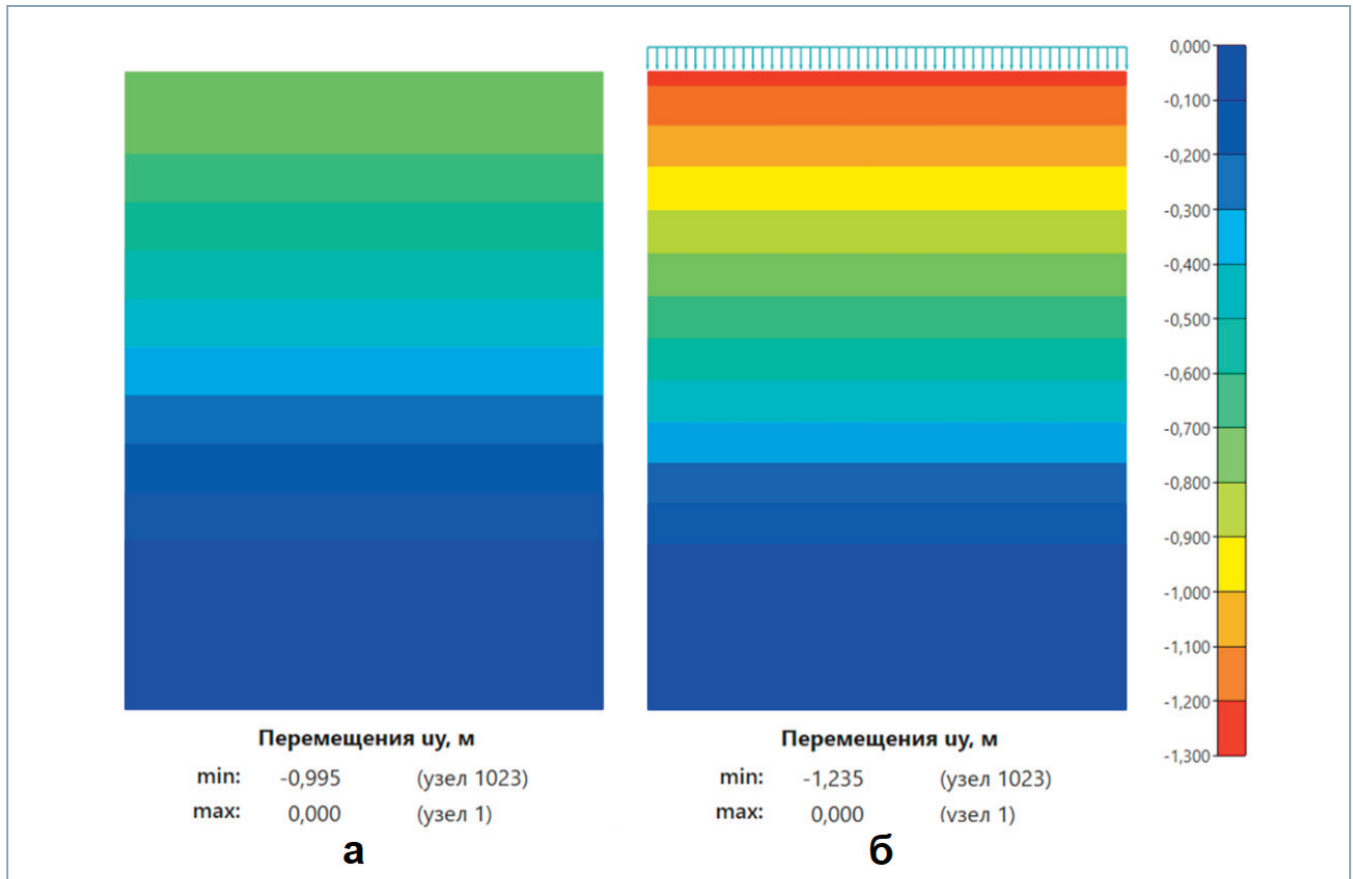


Рис. 2. Результаты расчетов осадки: а – за счет протаивания; б – за счет протаивания и уплотнения (общей тепловой осадки)

Значения коэффициента сжимаемости i -го слоя грунта ($m_{th,i}$) можно рассчитать с помощью приведенной в статье формулы по данным таблицы и соответствующим средним вертикальным напряжениям в грунтовых слоях.

По результатам численного моделирования рассматриваемого примера, осадка из-за протаивания составила 0,99 м, осадка за счет уплотнения получилась равной 0,24 м (рис. 2).

Сопоставление возможностей применения предлагаемого подхода в одномерной постановке и двухмерного численного моделирования

Результаты расчетов в программе и по аналитическим зависимостям [8] совпадают. Однако в представленном примере была использована простая линейно-деформируемая модель без критериев прочности. В действительности уплотнение грунта имеет нелинейный характер и требует использования других моделей, например модели компрессионного сжатия, для которой необходимо иметь результаты испытаний в одометре. В настоящее время ведется разработка специальной модели для расчета тепловой осадки, учитывающей обе составляющие деформации.

Преимущество предлагаемого подхода заключается в его универсальности: задача определения осадки насыпи при

оттаивании решается в одномерной постановке полностью в автоматизированном режиме, что существенно ускоряет работу проектных подразделений. Но при этом возможности численного моделирования позволяют решать эту задачу более реалистично, с учетом нестабилизированного состояния и консолидации, в том числе на основании трехслойной модели, изложенной в работе [15]. Кроме того, геотехническая модель является цифровым двойником объекта и позволяет:

- 1) назначать критерии мониторинга;
- 2) корректировать модель по результатам мониторинга и выполнять их анализ.


Выводы

Проектирование насыпей транспортных сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов в условиях изменений климата приводит к необходимости использования второго принципа с допущением оттаивания. Решение совместной температурной и механической задачи с учетом влияния отепляющего действия воды относится к разряду сложнейших и требует не только высокой квалификации исполнителя, но и наличия достаточных, полных и качественных исходных данных. Даже решение одной только теплофизической задачи требует калибровки расчетной схемы до начала

основного прогнозного расчета на основании термометрических наблюдений в годовом цикле, что на практике встречается не всегда.

Геотехнические расчеты позволяют оценивать правильность назначения принципа проектирования, прогнозировать деформации во времени и определять эффективность противодеформационных мероприятий. Любые грунтовые основания являются сложными системами, требующими особого внимания и подхода при проектировании сооружений. Многолетнемерзлые грунты требуют внимания вдвойне. Как показывает опыт, применение сложных моделей поведения грунта далеко не всегда бывает корректным, что связано с существенными различиями в подходах к расчетам в отечественной и зарубежной практике. Доступным решением пока остается

упрощенный подход, прописанный в нормативных документах, который позволяет использовать линейно-деформируемую модель грунта и одномерную постановку задачи, что дает возможность получать результаты, сопоставимые с данными расчетов ручным способом.

Численное моделирование в двухмерной постановке дает возможность исключить часть допущений ручных расчетов и решать задачу с большей достоверностью, в том числе использовать нелинейную зависимость между напряжениями и деформацией и учитывать упрочнение в процессе консолидации. Для выполнения большого количества расчетов рекомендуется использовать командную строку в программе SiO 2D, что позволяет автоматизировать процесс расчета тепловой осадки. 

Список литературы

1. Жданова С.М., Нератова О.А., Пиотрович А.А. Земляное полотно на подземных льдах и основаниях из льдистых грунтов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (55). С. 65–73.
2. Исаков А.Л., Моисеева И.С., Гудкова И.Н. Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 95–103.
3. Котов П.И., Роман Л.Т., Царапов М.Н. Влияние условий оттаивания и уплотнения на деформационные характеристики оттаивающих грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2017. № 1. С. 58–63.
4. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе Termoground // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. Т. 1. № 4. С. 83–84.
5. Святогорова А.В. Колос И.В., Кузнецова Д.Р., Вальцева Т.Ю. Расчет осадки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов земляного полотна при действии динамической нагрузки // Бюллетень результатов научных исследований (БРНИ). 2025. № 3. С. 124–134.
6. Bui T., Casarella A., Di Donna A., Brinkgreve R.B.J. Advanced thermo-hydro-mechanical modelling features for practical applications in energy geotechnics // Proceedings of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Reykjavik, 2019. Vol. 10.
7. Bishop A.W., Blight G.E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils // Geotechnique. 1963. Т. 13. № 3. С. 177–197.
8. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минстрой России, 2020.
9. ГОСТ 12248.10-2020. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия (с поправками от 13.07.2023). М.: Стандартинформ, 2020.
10. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: Наука/Интерпериодика, 2002. 425 с.
11. Киселев М.Ф. Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением. Л.: Стройиздат (Ленинградское отделение), 1978. 176 с.
12. Царапов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С., Мотенко Р.Г., Пустовойт Г.П. Обобщение экспериментальных и теоретических исследований физико-механических свойств грунтов Центральной Якутии: монография / под общ. ред. С.А. Новицкой. М.: КДУ, 2020.
13. Руководство пользователя SiO 2D // sio2d.ru. URL: https://sio2d.ru/user_manual/; https://help.sio2d.ru/user_manual/2025_2/ru_ru/index.html (дата последнего обращения: 17.09.2025).
14. Половникова Н.А. Цифровизация в строительстве в России // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 12-2. С. 102–105.
15. Вавринюк Т.С. Оценка устойчивости и деформативности земляного полотна железных дорог в условиях распространения мерзлоты: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2013. 24 с.

References

- Zhdanova S.M., Neratova O.A., Piotrovich A.A. Zemlyanoe polotno na podzemnykh l'dakh i osnovaniyakh iz l'distykh gruntov [Roadbed on underground ice and foundations composed of ice-rich soils] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya. 2020. № 4 (55). S. 65–73 (in Rus.).
- Isakov A.L., Moiseeva I.S., Gudkova I.N. Obosnovanie konstruktivnykh osobennosti zemlyanogo polotna iz dreniruyushchikh gruntov v kriolitozone s pomoshch'yu teplotekhnicheskikh raschetov [Substantiation of structural features of roadbeds made of draining soils in the permafrost zone using thermal engineering calculations] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya. 2025. № 1 (73). S. 95–103 (in Rus.).
- Kotov P.I., Roman L.T., Tsarapov M.N. Vliyanie uslovii ottaivaniya i uplotneniya na deformatsionnye kharakteristiki ottaivayushchikh gruntov [Influence of thawing and compaction conditions on the deformation characteristics of thawing soils] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya. 2017. № 1. S. 58–63 (in Rus.).
- Kudryavtsev S.A. Raschet protsessa promerzaniya i ottaivaniya po programme Termoground [Calculation of freezing and thawing processes using the Termoground program] // Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2004. T. 1. № 4. S. 83–84 (in Rus.).
- Svyatogorova A.V., Kolos I.V., Kuznetsova D.R., Val'tseva T.Yu. Raschet osadki ottaivayushchikh mnogoletnemerzlykh gruntov zemlyanogo polotna pri deistvii dinamicheskoi nagruzki [Calculation of settlements of thawing permafrost soils in roadbeds under dynamic loading] // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy (BRNI). 2025. № 3. S. 124–134 (in Rus.).
- Bui T., Casarella A., Di Donna A., Brinkgreve R.B.J. Advanced thermo-hydro-mechanical modelling features for practical applications in energy geotechnics // Proceedings of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Reykjavik, 2019. Vol. 10.
- Bishop A.W., Blight G.E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils // Geotechnique. 1963. Vol. 13. № 3. S. 177–197.
- SP 25.13330.2020. Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntakh [Foundations and Footings on Permafrost Soils]. M.: Minstroy Rossii, 2020 (in Rus.).
- GOST 12248.10-2020. Opredelenie kharakteristik deformiruемости merzlykh gruntov metodom kompressionnogo szhatiya (s popravkami ot 13.07.2023) [Determination of Deformability Characteristics of Frozen Soils by the Compression Test Method (with amendments dated July 13, 2023)]. M.: Standartinform, 2020 (in Rus.).
- Roman L.T. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen Soils]. M.: Nauka/Interperiodika, 2002. 425 s. (in Rus.).
- Kiselev M.F. Teoriya szhimaemosti ottaivayushchikh gruntov pod davleniem [Theory of Compressibility of Thawing Soils under Pressure]. L.: Stroizdat (Leningradskoe otdelenie), 1978. 176 s. (in Rus.).
- Tsarapov M.N., Kotov P.I., Volokhov S.S., Motenko R.G., Pustovoi G.P. Obobshchenie eksperimental'nykh i teoreticheskikh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov Tsentral'noi Yakutii: monografiya [Generalization of Experimental and Theoretical Studies of Physical and Mechanical Properties of Soils in Central Yakutia: Monograph] / pod obshch. red. S.A. Novitskoi. M.: KDU, 2020 (in Rus.).
- Rukovodstvo pol'zovatelya SiO 2D [SiO 2D User Manual] // sio2d.ru. URL: https://sio2d.ru/user_manual/ (data poslednego obrashcheniya: 17.09.2025) (in Rus.).
- Polovnikova N.A. Tsifrovizatsiya v stroitel'stve v Rossii [Digitalization in Construction in Russia] // Ekonomika i biznes: teoriya i praktika. 2022. № 12-2. S. 102–105 (in Rus.).
- Vavrinyuk T.S. Otsenka ustoichivosti i deformativnosti zemlyanogo polotna zheleznykh dorog v usloviyakh rasprostraneniya merzloty: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Assessment of Stability and Deformability of Railway Roadbeds under Permafrost Conditions: Extended Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences]. M., 2013. 24 s. (in Rus.).

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит
 в формате *PDF. 4 выпуска в 2026 году.

WWW.GEOINFO.RU

