

**Отзыв официального оппонента о диссертационной работе
Желнина Максима Сергеевича «Моделирование гидромеханического поведения
грунтов при искусственном замораживании», представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.**

Актуальность рассматриваемой проблемы.

В последние годы при глобальном потеплении климата активно происходят различные негативные мерзлотные процессы, связанные с напряженно-деформированным состоянием инженерных сооружений в районах многолетней мерзлоты. В связи с этим разработка программных средств для прогноза (моделирования) напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований инженерных сооружений в районах многолетней мерзлоты приобретает **актуальное практическое значение.**

Целью данной работы является построение трехмерной математической модели промерзания влагонасыщенных грунтов с учетом термогидромеханических эффектов при проходке вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания.

Новизна данных исследований – построение новой термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, которая учитывает температурную зависимость процесса миграции поровой воды, пучение, усадки и напряженно-деформированное состояние.

Характеристика структуры и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка из 194 литературных источников. Общий объем составляет 211 страниц.

В первой главе представлен обзор математических моделей теплопереноса и напряженно-деформированного состояния в мерзлых грунтах, начиная с 20-х годов прошлого века, и с охватом современного состояния отечественных и зарубежных исследований. Анализ современных работ показывает большое разнообразие подходов к построению термогидромеханических моделей, что свидетельствует о недостаточной изученности данного вопроса. Спорной остается взаимосвязь между температурой, образованием порового льда, миграцией влаги к фронту промерзания, морозным пучением грунта в замороженной зоне и его усадки вблизи фронта промерзания.

В целом же следует подчеркнуть, что фазовые превращения воды в порах занимают в проблеме криогенной миграции влаги и пучения особо важное место, поскольку они во многом определяют закономерности этих процессов. Кинетика кристаллизации воды сложна в дисперсных грунтах, а ее описание является важной и серьезной задачей, от решения которой зависит разработка и создание новых математических термогидромеханических моделей.

Вторая глава посвящена построению новой термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, которая является основной темой и содержанием диссертационной работы.

Автор разделяет существующие математические модели на три группы. Недостаток моделей первой группы заключается в отсутствии уравнений для описания механического поведения грунта. В моделях второй группы нет уравнения расчета

изменения давления поровой влаги и, как следствие, не учитывается его влияние на напряженно-деформированное состояние грунта в процессе промерзания-протаивания.

Одной из основных причин неработоспособности существующих термогидромеханических моделей является неопределенность граничных условий на фронте фазового перехода, теплофизических, массообменных и деформационных характеристик в зоне промерзания-протаивания (Гречищев, 1980; Кулик, 1973; и т.д.).

Только появление современных вычислительных средств и методов, теории решения обратных задач и ряда различных работ по тепломассообмену и напряженно-деформированному состоянию дало толчок развитию новых подходов к описанию криогенных процессов.

Автором разработана трехмерная термогидромеханическая модель процесса промерзания влагонасыщенного грунта. В уравнении деформации с кинетикой фазового перехода поровой воды, вводится новый модифицированный член, который учитывает динамику порового давления и объемной деформации скелета при промерзании-протаивании грунтовой воды. Достоинством предложенной модели является учет объемной деформации грунта при примерзании-протаивании грунтовой воды, что очень важно для геотехнических расчетов в мерзлотоведении. Дополнительные члены также описывают процесс неупругой деформации ползучести и пластичности.

Численная реализация предложенной термогидромеханической модели осуществляется в конечно-элементном пакете Comsol Multiphysics®. Особенность предложенного подхода заключается в том, что численное решение массопереноса в данном пакете выполняется относительно пористости n . При этом численное решение уравнений теплопереноса и равновесия проводится стандартным образом относительно температуры и перемещения. Осуществлен анализ сходимости решения уравнений для температуры, пористости и перемещения.

В третьей главе отображены результаты верификации модели на основе лабораторных экспериментов и одноосных механических испытаний грунта на ползучесть при искусственном замораживании влагонасыщенных грунтов.

Верификация модели проведена путем сопоставления результатов численного моделирования супеси, алевритистой глины и песка с данными лабораторных экспериментов. Полученные отклонения для исследуемых величин не превышают 10%.

Дополнительное моделирование одноосных механических испытаний образцов замороженного алевритистого песка при различных режимах длительного нагружения показало, что рассчитанные деформации ползучести хорошо описывают экспериментальные данные на стадиях не установившегося и установившегося реологического течения с отклонением не более 11%.

Четвертая глава посвящена применению разработанной термогидромеханической модели к расчету формирования ледопородного ограждения (ЛПО) для строительства вертикального шахтного ствола на руднике Петриковского ГОК.

Проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовых слоев при их искусственном замораживании для проходки вертикального шахтного ствола на руднике Петриковского ГОК с учетом и без учета миграционного процесса. Показано, что НДС массива грунта зависит от температуры и процесса

миграции поровой воды. Поскольку от процесса промерзания поровой воды зависят теплофизические, массообменные и механические характеристики грунтов, то при фазовом превращении воды меняется пористость, которая связана с пучением и усадкой грунта, сжатием и растяжением его скелета.

В главе достаточно детально рассмотрена динамика образования ЛПО вокруг проектного сечения шахтного ствола при искусственном замораживании слоев алевролита и песка. В результате численного моделирования получены и показаны сравнительные графические зависимости динамики среднего эффективного напряжения, а также порового давления с учетом миграции влаги.

Изучена работоспособность и достоверность модели для описания искусственного замораживания грунтовых слоев, выполнено сравнение с полевыми измерениями температуры и уровнем подземных вод, полученных в результате мониторинга ЛПО на Петриковском месторождении.

Показано, что возникающее в процессе замораживания грунта криогенная миграция влаги и морозное пучение приводят к изменению бокового давления на внешнюю границу ЛПО и изменению порового давления в незамороженном грунте внутри ЛПО.

В пятой главе представлены результаты исследования процесса деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки, пройденной под защитой ледопородного ограждения.

Установлено, что возникающее в грунтовых слоях при формировании ЛПО морозное пучение и криогенная миграция влаги приводят к изменению их природного напряженно-деформированного состояния и увеличению радиального перемещения стенки шахтной выработки, пройденной внутри ЛПО.

Оценка деформации ползучести алевролита и песка, проведенная с использованием данных Института природопользования НАН Беларуси, показала, что происходит выпучивание боковой стенки шахтной выработки и поднятие ее дна.

На основе результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния шахтной выработки внутри ЛПО выполнен теоретический анализ формул Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. для расчета проектной толщины ЛПО по критериям предельного деформированного и напряженного состояния. Для проведения моделирования предложена новая расчетная схема, учитывающая механическое поведение грунта ниже дна заходки. По результатам теоретического анализа предложены модифицированные формулы для оценки безопасной толщины ЛПО от бокового давления для технологических условий проходки на руднике Петриковского ГОК.

Обоснованность применяемых методик и достоверность полученных результатов.

Достоверность построенной математической модели проверена как по лабораторным экспериментам, так и в реальных условиях искусственного замораживания грунтовых слоев на руднике Петриковского ГОК. Модель может быть применена для оценки тепловлажностного и напряженно-деформированного состояния породного массива при проведении горных работ.

Новизна и обоснование полученных защищаемых положений.

Построена новая термогидромеханическая модель, проведена верификация параметров модели на лабораторных испытаниях на пучинистость и ползучесть, выполнены различные численные расчеты формирования ЛПО и проходки шахтного ствола для гидрогеологических условий рудника Петриковского ГОК.

Полученные результаты позволяют говорить о диссертационной работе М.С. Желнина, как о состоявшемся научном исследовании.

Однако сложность и многоаспектность рассматриваемой темы оставляет возможности для научного спора и замечаний.

1. В реальных условиях процесс промерзания связан с процессом протаивания. Следует проверить работоспособность модели при циклическом промерзании–протаивании.

2. Проходка шахтного ствола не всегда выполняется в полностью насыщенных грунтах, поскольку в породных массивах встречаются ненасыщенные грунтовые слои. Каким образом предложенная модель будет описывать замораживание ненасыщенных грунтов?

Личный вклад автора заключается в анализе современного состояния исследований по теме работы, участии в построении термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, выполнении ее компьютерной реализации, проведении численного моделирования изучаемых процессов и сопоставлении результатов расчета с данными лабораторных экспериментов и полевых измерений.

Стиль изложения, оформление работы.

Описание и результаты численных расчетов и экспериментальных работ, в основном, оформлены аккуратно и адекватно иллюстрированы рисунками.

Публикация и апробация работы.

Основные результаты исследований, апробированы на 12 международных и российских научных конференциях, опубликованы 18 научных работ, проиндексированных в международных системах цитирования и входящих в список журналов, рекомендованных ВАК.

Общее заключение по работе.

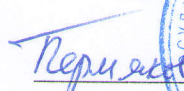
Диссертация Желнина Максима Сергеевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Положения, вынесенные на защиту, хорошо проверены в лабораторных и натурных условиях, обоснованы диссертантом и не вызывают возражений. Работа выполнена самостоятельно на высоком научном уровне.

Оформление и структура автореферата дает ясное представление о целях, методах, результатах и перспективах исследования. Полученные результаты являются новыми, актуальными и имеют высокую научную и практическую значимость. Результаты диссертационной работы в полной степени представлены в публикациях и обсуждены на всероссийских и международных конференциях.

Принимая во внимание все вышесказанное, считаю, что диссертационная работа «Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании» удовлетворяет всем требованиям пункта 9 «Положения и присвоение учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации

от 24.09.2013 N842 (с изменениями согласно Постановлению Правительства РФ от 21.04.2016 N 335)), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Желнин Максим Сергеевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории геотермии криолитозоны
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»
доктор физико-математических наук по специальности
01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника и
по специальности 03.00.16 – экология



Петр Петрович Пермяков

Подпись П.П. Пермякова заверяю:
Зам. директора
по научной работе ИМЗ СО РАН



Федоров Александр Николаевич

« 22 » ноября 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждения науки «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН», 667010, г. Якутск, РС(Я) ул. Мерзлотная, д. 36,
e-mail: permyakov2005@mail.ru , тел. +7-914-233-50-83.