



УТВЕРЖДАЮ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

И.о. проректора по научно-
организационной деятельности,
Д.Т.Н.



Клочков Ю.С.

«15» ноября 2021г.

15.11.2021 № КОД-15/21мех
на № _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Желнина Максима Сергеевича

«Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации. В диссертационной работе Желнина М.С. выполнены исследования по актуальной тематике изучения механического поведения искусственно замораживаемых обводненных грунтов. Интерес к данным исследованиям связан с необходимостью достоверной оценки несущей способности ледопородных ограждений, от целостности которых зависит безопасность проходки шахтных стволов через неустойчивые грунтовые слои с высоким влагосодержанием и низкими прочностными свойствами.

Среди перспективных подходов и методов, направленных на описание деформирования промерзающих и мерзлых грунтов, следует отметить термогидромеханические модели, учитывающие взаимодействие между изменением напряженно-деформированного состояния, теплопереносом и массопереносом. Данные модели позволяют достичь наиболее полного и адекватного описания механического поведения грунтов в зависимости от протекающих в них криогенных процессов таких, как морозное пучение, миграция влаги, усадка обезвоженной зоны. Вместе с тем, задача построения термогидромеханических моделей, применимых для проведения

крупномасштабного численного моделирования напряженно-деформированного состояния искусственно замороженных грунтовых слоев в гидрогеологических условиях реальных месторождений, еще далека от окончательного решения.

Диссертационная работа посвящена построению математической модели промерзания влагонасыщенных грунтов с учетом термогидромеханических эффектов, ее применению для исследования процесса проведения вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания и анализа данных, полученных путем термометрического мониторинга и измерений в гидронаблюдательных скважинах.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация Желнина М.С. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 192 наименований. Диссертация изложена на 211 страницах, включая 60 рисунков и 19 таблиц.

Введение содержит обоснование актуальности выбранной темы исследования и характеристику степени ее разработанности. Сформулирована цель работы – построение трехмерной математической модели промерзания влагонасыщенных грунтов с учетом термогидромеханических эффектов, позволяющей провести моделирование мероприятий, выполняемых при проходке вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания. Приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Указана информация о степени достоверности и апробации результатов. Представлено краткое описание содержания глав диссертационной работы.

В первой главе приведен научный литературный обзор. Дана общая информация о существующих подходах и соотношениях для описания криогенных процессов в промерзающих грунтах и нелинейного деформирования грунтов в мерзлом состоянии. Большое внимание уделено современным термогидромеханическим моделям промерзания влагонасыщенных грунтов, рассматривающим взаимодействие между льдообразованием, криогенными течениями и изменением напряженно-деформированного состояния. Проведен анализ теоретических положений, использованных при их построении, и результатов применения к решению реальных геотехнических задач.

Во второй главе представлена термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта, построенная в рамках теории поромеханики. В представленной модели единое уравнение баланса массы воды и льда, записывается относительно пористости грунта с использованием закона Дарси, уравнения Клаузиуса-Клапейрона и соотношения поромеханики, устанавливающего связь между пористостью и поровым давлением. Гидромеханическое взаимодействие описывается, исходя из изменения пористости, вызванного увеличением объема воды при замерзании и миграцией влаги к

фронту промерзания под действием криогенного всасывания. Для учета нелинейного деформирования грунта вследствие морозного пучения и ползучести предложены определяющие соотношения для неупругой объемной деформации и вязкоупругой деформации. Описан алгоритм реализации балансовых уравнений и определяющих соотношений, включенных в модель, в конечно-элементном пакете Comsol Multiphysics®.

В третьей главе продемонстрирована применимость разработанной модели к описанию искусственного замораживания грунтов в лабораторных экспериментах и ползучести мерзлого грунта при длительном одноосном нагружении. Рассмотрены лабораторные эксперименты по одностороннему замораживанию грунтов в условиях закрытой и открытой системы, опытные измерения которых широко используются для верификации моделей промерзания грунтов. Также проведен эксперимент по радиальному замораживанию грунта, в котором измеряется его радиальная деформация с помощью волоконно-оптического датчика. Показано, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В четвертой главе приводятся результаты применения термогидромеханической модели к трехмерному и двумерному численному моделированию искусственного замораживания грунтовых слоев, входящих в осадочный чехол Петриковского месторождения калийных солей. Представлена процедура идентификации части параметров модели на основе испытаний по измерению степени пучинистости. На основе трехмерного численного моделирования исследовано изменение температуры, пористости, природного напряженно-деформированного состояния при замораживании слоев алевролита и песка. Показано хорошее согласование рассчитанных зависимостей температуры от времени с натурными измерениями, полученными в ходе температурного мониторинга формирования ледопородного ограждения на указанном месторождении. Проиллюстрировано, что объемное расширение грунта при замерзании способствует увеличению нагрузки на внешнюю нагрузку ледопородного ограждения, сжатию незамороженного грунта, заключенного внутри ледопородного ограждения, и росту порового давления воды. Установлено, что возникновение криогенных течений в слое алевролита приводит к формированию неоднородного распределения льда по толщине ледопородного ограждения, увеличению пористости в замороженной зоне вплоть до 21%, сжатию грунта вблизи фронта промерзания и замковой плоскости, переносу влаги из незамороженного грунта к внутренней границе ледопородного ограждения. Результаты двумерного численного моделирования искусственного замораживания двух слоев песка, описали изменение уровня подземных вод со временем, измеренного в гидронаблюдательных скважинах на Петриковском месторождении, и показали, что

поровое давление воды внутри сплошного ледопородного ограждения зависит как от сил морозного пучения, так и интенсивности криогенных течений.

В пятой главе представлены результаты расчетов деформирования шахтной выработки, пройденной под защитой сплошного ледопородного ограждения в слоях, залегающих на Петриковском месторождении. На основе результатов расчетов изменения природного напряженно-деформированного состояния, проведенных в главе 4, показано, что возникновение при искусственном замораживании криогенных процессов в слое алевролита приводит к увеличению радиального перемещения стенки выработки на 32%, при проектной толщине ледопородного ограждения, и на 47%, при промерзании грунта до проектного сечения шахтного ствола, а в слое песка – на 13% и 27%. Результаты численного моделирования деформирования ледопородного цилиндра в слоях песка, мела и глины были использованы для анализа формул Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. по оценке проектной толщины ледопородного ограждения по критериям предельного деформированного и напряженного состояния. Для проведения моделирования предложена схема неподкрепленного участка ледопородного ограждения, учитывающая механический отклик грунта ниже дна заходки. На основе проведенного анализа построены новые аппроксимационные зависимости, позволяющие получить оценки проектной толщины ледопородного ограждения от бокового давления по критериям предельного состояния, согласованные с результатами численного моделирования.

Заключение содержит основные результаты и выводы диссертационной работы, подтверждающие выполнение поставленной цели и задач исследования, перспективы дальнейшей разработки темы.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в разработке и компьютерной реализации в пакете Comsol Multiphysics® трехмерной термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, позволяющей описывать его напряженно-деформированное состояние, а также рассчитывать криогенные течения и деформации морозного пучения. Практическая значимость работы заключается в разработке подхода к численному моделированию искусственного замораживания обводненного грунтового слоя и неупругого деформирования шахтной выработки на стадии проходческих работ под защитой ледопородного ограждения. Предложенная модель может быть использована для проектирования и оптимизации искусственного замораживания, интерпретации данных мониторинга температуры и уровня подземных вод. При этом для идентификации параметров модели требуются только стандартизованные лабораторные испытания грунтов. Также в работе получены аппроксимирующие соотношения, пригодные для

инженерной оценки безопасной толщины ледопородного ограждения от бокового давления.

Степень обоснованности и достоверность результатов диссертационной работы обеспечиваются использованием при построении модели предположений и гипотез, согласующихся с экспериментальными наблюдениями и непротиворечащими физике исследуемых процессов. Полученные в работе результаты численного моделирования находятся в удовлетворительном соответствии с опытными данными, полученными в лабораторных экспериментах в «ИМСС УрО РАН», Институте природопользования НАН Беларуси и других исследовательских центрах, а также полевыми измерениями, выполненными при искусственном замораживании на руднике Петриковского ГОК.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Выводы, рекомендации и научные результаты диссертации Желнина М.С. могут быть использованы при проведении расчётов инженерных сооружений, взаимодействующих с замороженным грунтом и для дальнейших научных исследований в учреждениях РАН, таких как Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Москва), Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (Якутск), Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН (Якутск), Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, и в высших учебных заведениях, таких как Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург), Санкт-Петербургский горный университет (Санкт-Петербург), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва).

Научная новизна полученных результатов. Построена и верифицирована по данным лабораторных экспериментов новая термогидромеханическая модель замерзания влаги в грунте, позволяющая описать взаимовлияние между изменением температуры, льдообразованием, криогенными течениями, морозным пучением и усадкой. Предложен подход к численному моделированию искусственного замораживания грунтовых слоев для проходки шахтного ствола, включающий в себя идентификацию параметров модели по данным стандартизованных испытаний, расчет формирования ледопородного ограждения, оценку радиального перемещения стенки шахтной выработки, пройденной внутри ледопородного цилиндра. В масштабе одного грунтового слоя показано влияние морозного пучения и криогенной миграции влаги на напряженно-деформированное состояние грунта, формирование льдистости в замороженной зоне и изменения уровня подземных вод в незамерзшей зоне, ограниченной сплошным ледопородным ограждением. Количественно определено влияние криогенных процессов на радиальное перемещение

стенки шахтной выработки, пройденной внутри ледопородного ограждения. Построены новые аппроксимационные зависимости для расчета безопасной толщины ледопородного ограждения от бокового давления, позволяющие проводить оптимизацию режима замораживания для конкретных инженерно-геологических условий.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность темы исследования, его цель и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Публикация основных результатов диссертации в научной печати. Основное содержание диссертации отражено в 18 публикациях в журналах, индексируемых в международных системах цитирования и входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, включённых Высшей аттестационной комиссией России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук. Результаты, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на 12 научных конференциях.

Замечания по диссертации.

1. В работе содержится недостаточно сведений о том, как разработанная модель описывает процессы, возникающие в зоне промерзания, заключенной между замороженной и незамороженной зоной. Какие условия задаются на границах этой зоны? Как рассчитывается закон Дарси внутри этой зоны? Какие физические механизмы определяют изменение пористости внутри зоны?
2. В модели используется предположение об отсутствии воздушной фазы в рассматриваемой системе пористая среда–жидкость. Насколько данное предположение влияет на пределы применимости используемой модели?
3. Для описания ползучести замороженного грунта в модели используется степенной закон (соотношение 2.29), который, как показано в главе 3, позволяет описать только неустановившуюся и установившуюся стадии ползучести. Достаточно ли такой модели ползучести для расчета деформирования стенки шахтной выработки?
4. При описании уравнения (2.30) присутствует ссылка на границы применимости, которые аналогичны ограничениям, накладываемым на уравнение (1.19), однако в тексте эти ограничения в явном виде не представлены.
5. В уравнении (2.39) отсутствует правая часть.
6. При сравнении экспериментальных данных и численного решения в параграфе 3.1, на рисунке 3.1, на графике наблюдается «плато» в экспериментальных данных при небольших глубинах промерзания, однако численная модель принимает значения

локального максимума в этой точке. Как физически объяснить данное «плато»? В связи с какими допущениями модели в численном решении не наблюдается «горизонтального участка»?

7. В параграфе 3.2 при сравнении эмпирических данных с численным экспериментом максимальное несовпадение на рисунке 3.4 наблюдается при некой «промежуточной» высоте (40мм). Так же там явно не совпадают темпы падения температуры. Данное несовпадение может быть вызвано неким процессом, идущим на данной высоте, или погрешностью экспериментальных данных?

8. В пункте 4.2.1 описывается промерзание образцов песка и алевролита. Экспериментальные данные перемещений взяты из работы [174]. Далее в работе приведено сравнение с этими экспериментальными данными (рисунок 4.3 (а), (в)), где эмпирический результат представлен уровнем на графике. Совпало ли рассчитанное время численно с тем, что было получено в эксперименте? Почему график для алевролита не выходит на стационарное значение?

9. В распределении среднего эффективного напряжения (рисунки 4.17 и 4.18) наблюдаются разрывы. Чем их можно объяснить? Какое изменение модели могло бы их устранить?

Данные замечания не являются препятствием к вынесению положительной оценки работы в целом, которая представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне и которую можно квалифицировать как решение важной научной проблемы, имеющей существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела.

Заключение. Диссертационная работа **Желнина Максима Сергеевича** является завершенной научно-квалификационной работой по актуальной теме механики деформируемого твёрдого тела, имеющей значение для развития механики связанных задач и моделей механического поведения замороженных грунтов. Содержание и структура диссертации обладают внутренним единством и соответствуют поставленной цели исследования. Результаты научных исследований, выполненных автором, обладают научной новизной, имеют теоретическую и практическую значимость, а выдвигаемые соискателем положения и сформированные выводы являются обоснованными и достоверными.

Диссертация **Желнина Максима Сергеевича** удовлетворяет п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., (ред. от 11.09.2021)), а ее автор **Желнин**

Максим Сергеевич заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв подготовлен профессором Высшей школы «Теоретическая механика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого», доктором физико-математических наук (специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), Кузькиным Виталием Андреевичем.

Диссертационная работа **Желнина Максима Сергеевича** и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании семинара Высшей школы «Теоретической механики». Присутствовало на заседании 15 человек, протокол № 7 от 11 ноября 2021 года. Результаты голосования: «за» – 15 человек, «против» – 0, «воздержалось» – 0.

Директор Высшей школы «Теоретической механики»

Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского

политехнического университета Петра Великого»,

доктор физико-математических наук,

член корреспондент РАН



/ Кривцов Антон Мирославович

Профессор Высшей школы «Теоретической механики»

Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского

политехнического университета Петра Великого»,

доктор физико-математических наук



/ Кузькин Виталий Андреевич

ФГАОУ ВО «СПбПУ», 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, тел. +7 981 707 87 02, e-mail: kuzkin@spbstu.ru

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Телефон: +7 (812) 552-67-57

E-mail: rector@spbstu.ru

