

На правах рукописи



Семин Михаил Александрович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБА
ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Пермь 2022

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).

Научный консультант: **Левин Лев Юрьевич**
доктор технических наук,
заведующий отделом аэрологии и теплофизики.
«ГИ УрО РАН» (г. Пермь).

Официальные оппоненты: **Демежко Дмитрий Юрьевич**
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник лаб. геодинамики
Института Геофизики УрО РАН (г. Екатеринбург),

Курилко Александр Сардокович
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаб. горной теплофизики.
Институт горного дела Севера СО РАН (г. Якутск),

Майоров Александр Евгеньевич
доктор технических наук, профессор РАН,
заведующий лабораторией.
Институт угля СО РАН (г. Кемерово).

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»** (г. Тула).

Защита диссертации состоится «__» июня 2022 года в __-__ часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permsc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года. Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, представившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А, Ученый совет «ГИ УрО РАН». Телефон/факс: (342) 216-75-02.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук



С. Ю. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Сложные инженерно-геологические и гидрогеологические условия строительства подземных сооружений требуют применения специальных способов ведения горных работ, в частности, искусственного замораживания грунтов и породных массивов. Применительно к строительству шахтных стволов искусственное замораживание используется для создания ледопородного ограждения (ЛПО) вокруг проектируемой горной выработки. Для этого при использовании рассольной схемы замораживания по контуру горной выработки бурятся скважины, в которые опускаются замораживающие колонки. За счет работы холодильных станций по колонкам осуществляется циркуляция хладоносителя (рассола) с некоторой поддерживаемой отрицательной температурой (как правило, в диапазоне от -20 до -50 °С). В результате циркуляции охлаждающего рассола в замораживающей колонке окружающий ее породный массив постепенно охлаждается, а содержащаяся в его порах вода кристаллизуется. По истечении некоторого времени вокруг замораживающих колонок образуются одиночные ледопородные цилиндры, которые в дальнейшем смыкаются, образуя сплошное ЛПО. Последнее служит для предотвращения поступления подземных вод в строящуюся горную выработку до возведения тубинговых колонн и герметизации стыков между ними, а также для уменьшения деформаций незакрепленных стенок породного массива до возведения крепи.

Решение о начале проходки шахтного ствола принимается после того, как ЛПО достигнет требуемой толщины, имеет сплошность по всему круговому контуру и всей глубине, а средняя температура ЛПО не превышает заданную величину. Перечисленные параметры являются основными параметрами ЛПО, а их правильное и научно-обоснованное определение обеспечивает быстрое и безаварийное строительство ствола.

Расчет ЛПО включает в себя статический (механический) расчет требуемых толщин ЛПО по условиям прочности и ползучести, а также теплотехнический расчет, позволяющий определить параметры системы замораживания, спрогнозировать длительность формирования ЛПО требуемой толщины, а также осуществлять мониторинг текущего распределения температур в породном массиве по данным измерений в контрольно-термических скважинах.

Вопросы статического расчета ЛПО и механики мерзлых пород исследовались с середины XX века как российскими, так и зарубежными исследователями: Н.А. Цытовичем, С.С. Вяловым, Ю.К. Зарецким, В.В. Суриковым, Х.К. Хакимовым, И.Д.

Насоновым, П.М. Тютюнником, Ю.М. Либерманом, Г.П. Бровкой, А.С. Курилко, Б.А. Картозией, М.Н. Щупликом, F. Sayles, O. Andersland, Y. Wang, W. Yang, B. Zhang и др. Теплотехническому расчету ЛПО, а также расчету теплофизических процессов шахт и рудников в условиях наличия мерзлых пород посвящены исследования Н.Г. Трупака, Г.И. Маньковского, Я.А. Дормана, О.А. Долгова, М.У. Бельфермана, А.А. Роменского, И.В. Баклашева, М.Н. Щуплика, А.С. Курилко, Ю.В. Шувалова, Д.Ю. Дядькина, С.Г. Гендлера, А.Н. Щербаня, А.Ф. Воропаева, И.Р. Венгерова, O. Andersland, J. Holden, J. Harris, A. Sasmito, M. Tijani, G. Newman, J. Hu и др.

Ограниченные возможности вычислительной техники в XX веке привели к развитию приближенных методов как статического, так и теплотехнического расчетов ЛПО. На тот период времени разработанные приближенные методы хорошо зарекомендовали себя при решении практических задач и вошли в нормативную литературу по искусственному замораживанию пород и грунтов, используемую по сей день. Современное развитие вычислительной техники позволяет расширить и детализировать математические модели термогидромеханических процессов, происходящих в замораживаемых породах, поэтому появилась возможность доработки существующих в литературе приближенных методов.

В настоящее время проводятся частные исследования процессов, происходящих при искусственном замораживании пород с использованием современных вычислительных средств, однако они требуют систематизации и обобщения. Помимо этого, крайне важным и неизученным вопросом является комплексный анализ теоретических и экспериментальных данных о формировании ЛПО вокруг строящихся подземных сооружений: в настоящее время существующие теоретические и экспериментальные методы применяются для анализа состояния ЛПО по-отдельности и зачастую дают несогласующиеся друг с другом результаты, что ставит под вопрос корректность как первых, так и вторых.

На сегодняшний день такие крупнейшие горнодобывающие предприятия, как ПАО «Уралкалий», ОАО «Беларуськалий», ИООО «Славкалий», АК «МХК «ЕвроХим» ведут или планируют строительство новых калийных рудников и проходку шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. С учетом этого работа, ориентированная на научное обоснование технологии искусственного замораживания породного массива, является актуальной для обеспечения безопасных условий труда и высоких технико-экономических показателей при строительстве шахтных стволов.

Цель работы

Разработать теоретические и технологические основы расчета искусственного замораживания породного массива при строительстве шахтных стволов, направленные на обеспечение комплексной безопасности при ведении горных работ.

Основная идея работы

Определение физических и технологических параметров системы замораживания породного массива основывается на комплексном взаимоувязанном анализе термогидромеханических процессов в породном массиве и крепи ствола, аэрологических процессов в атмосфере ствола.

Основные задачи работы

1. Разработать и развить методы математического моделирования термогидромеханических процессов в замораживаемом породном массиве и аэрологических процессов в строящейся горной выработке.
2. Провести анализ теплофизических процессов в замораживаемом породном массиве и определить основные проектные параметры систем замораживания породного массива.
3. Определить условия, при которых возможно формирование ЛПО проектных параметров в породном массиве с выраженной фильтрацией подземных вод.
4. Провести исследование вентиляционных процессов, происходящих в горных выработках в условиях отрицательных температур крепи и окружающего замороженного породного массива.
5. Исследовать изменение напряженно-деформированного состояния и устойчивости ЛПО шахтных стволов во времени в условиях различных внешних нагрузок.
6. Разработать научно-обоснованные математические методы интерпретации данных скважинной термометрии и обосновать технологические параметры систем мониторинга искусственного замораживания пород.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования динамики температуры породного массива по глубине контрольно-термических скважин, температуры воздуха и крепи шахтных стволов, обработку экспериментальных данных, теоретический анализ закономерностей

протекания различных физических процессов в замораживаемом породном массиве, постановку математических моделей породного массива, их алгоритмизацию и проведение численного моделирования, сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Связанная математическая модель системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь горной выработки – атмосфера горной выработки» с возможностью дифференцированного учета термогидромеханических и аэрологических процессов, протекающих при искусственном замораживании пород, позволяет проводить комплексный теоретический анализ состояния ледопородных ограждений.
2. Определение технологических параметров систем замораживания посредством численного многопараметрического моделирования физических процессов в породном массиве и их оптимизации по критериям безопасности и энергоэффективности позволяет уменьшить сроки строительства горных выработок в сложных гидрогеологических условиях и обеспечить поддержание проектных параметров ледопородного ограждения в течение всего периода проходки, крепления и гидроизоляции шахтного ствола.
3. Количественная оценка обеспечения проектных параметров ледопородного ограждения в условиях высокой обводненности и гидравлической проводимости породного массива должна осуществляться на основании анализа закономерностей фильтрации подземных вод в замораживаемом породном массиве как в режиме вынужденной, так и в режиме свободной конвекции.
4. Параметры движения воздушных потоков в вертикальной строящейся горной выработке, рассчитанные с учетом наличия градиента температур и переменной плотности воздуха, позволяют повысить адекватность моделирования теплообмена между крепью ствола и воздухом и обеспечить надежное проветривание строящейся горной выработки.
5. Расчетные толщины ледопородных ограждений по критериям предельного равновесного состояния и предельных деформаций замороженных пород существенным образом зависят от таких физических факторов как вертикальная нагрузка вышележащих пород, напряженно-деформированное состояние окружающих незамороженных пород, фактическая неоднородность поля температур и фактические технологические параметры заходки.

6. Безопасность работ при строительстве горных выработок способом искусственного замораживания достигается за счет развертывания комплексной системы мониторинга теплового режима породного массива, крепи строящейся горной выработки и аэрологических параметров атмосферы горной выработки, обеспечивающей параметризацию связанной математической модели системы по данным экспериментальных измерений и повышающей достоверность анализа состояния ледопородного ограждения.

Научная новизна:

1. Определен набор критериальных условий, при достижении которых возможен обоснованный переход от связанной термогидромеханической модели системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь горной выработки – атмосфера горной выработки» к более простым моделям, учитывающим отдельные физические процессы при искусственном замораживании пород и грунтов.
2. Получены функциональные зависимости параметров ЛПО от технологических параметров системы замораживания, параметров теплопереноса в замораживаемом массиве горных пород, позволяющие сделать количественный анализ состояния ЛПО и его развития в будущем при различных штатных и аварийных ситуациях.
3. Определены условия возникновения частично-возвратных течений воздуха в строящемся стволе вследствие наличия температурного градиента, обусловленного низкой температурой окружающих замороженных пород; произведена количественная оценка интенсификации теплообмена воздуха и крепи строящегося ствола при наличии частично-возвратных течений воздуха.
4. Рассчитаны поправочные коэффициенты для аналитических формул по расчету требуемой толщины ЛПО, позволяющие корректно учесть защемление на торцах ледопородного цилиндра, его температурную неоднородность, а также условие потери несущей способности ЛПО.
5. Разработана методика калибровки параметров модели тепловых процессов в породном массиве, обеспечивающая единственность решения обратной задачи и позволяющая добиться наилучшего согласования модельных и измеренных температур в контрольно-термических скважинах.
6. Определены технологические параметры системы термометрического мониторинга замораживаемого массива, крепи строящейся горной выработки и

аэрологических параметров атмосферы горной выработки, позволяющие обеспечить более достоверное прогнозирование состояния ЛПО посредством взаимного уточнения результатов математического моделирования и экспериментальных измерений температуры в контрольно-термических скважинах.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натуральных экспериментов, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами, значительным объемом наблюдений, выполненных в натуральных условиях при проведении мониторинговых исследований формирования ЛПО строящихся стволов на рудниках ОАО «Беларуськалий», ИООО «Славкалий», ЗАО «ВКК», ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий».

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты могут использоваться при проектировании замораживания горных пород и систем мониторинга формирования ЛПО. Эти результаты позволят увеличить точность расчета технологических параметров систем замораживания горных пород, повысить достоверность прогнозирования параметров ЛПО и тем самым повысить безопасность ведения горных работ при строительстве шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

На основании полученных результатов разработано программное обеспечение «FrozenWall», функциональные возможности которого позволяют вывести на качественно новый уровень контроль физических процессов, происходящих в породном массиве в условиях его искусственного замораживания.

Система термометрического контроля ЛПО строящихся шахтных стволов запатентована и реализована на руднике Петриковского ГОК и Дарасинском руднике ОАО «Беларуськалий», рудниках Нежинского ГОК ИООО «Славкалий» и Талицкого ГОК ЗАО «ВКК». При помощи разработанной системы контроля для горных предприятий ежедневно формировались отчеты о состоянии ЛПО, на основании которых принимались решения о возможности начала проходки шахтных стволов, осуществлялась выдача заключений о достижении сплошности и минимально требуемой толщины ЛПО, предоставлялись рекомендации по корректировке параметров работы замораживающих станций, а также выполнялся прогноз с учетом различных

технологических факторов, влияющих на состояние ЛПО. Полученные результаты исследований включены в Инструкцию по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий».

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований «ГИ УрО РАН», проводившихся в период 2015—2022 гг., по темам «Разработка теоретических основ прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями режимов проветривания и газодинамическими явлениями в рудниках при освоении месторождений минерального сырья» (регистрационный номер НИОКТР: АААА-А17-117120620167-2) и «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими и аэрологическими процессами в рудничной атмосфере и массивах горных пород при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (регистрационный номер НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2), а также с тематикой хоздоговорных работ с горными предприятиями ОАО «Беларуськалий», ИООО «Славкалий», ЗАО «ВКК» и ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий».

С 2015 по 2022 гг. исследования по теме диссертации были поддержаны и частично финансировались Российским научным фондом (проект РНФ № 17-11-01204 «Структурно-энергетические модели деформирования и разрушения природных и искусственных материалов в условиях Арктических температур», проект РНФ № 19-77-30008 «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов»), Советом по грантам Президента Российской Федерации (проект № МД-7047.2015.5 «Разработка инновационной ресурсосберегающей системы мониторинга и управления вентиляцией горных предприятий, обеспечивающей безопасную и высокопроизводительную добычу полезных ископаемых в сложных горнотехнических условиях», проект № МК-6244.2018.5 «Моделирование сопряженного тепло- и массопереноса в нефтенасыщенном песчанике, окружающем породном массиве и шахтной атмосфере при подземной добыче высоковязкой нефти методами паротеплового воздействия на пласт»), Уральским отделением Российской академии наук (проект № 18-5-5-5 «Исследование тепловых процессов в породном массиве и рудничной атмосфере в условиях самовозгорания сульфидных руд»), Министерством науки и высшего образования Пермского края (Соглашение № С-26/563 по проекту «Исследование влияния миграции

минерализованных подземных вод на формирование и механические характеристики ледопородных ограждений строящихся горных выработок»).

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» (Пермь, 2017-2021 гг.), на Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена — 2015» (Новосибирск, 2015 г.), на Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2016-2017 гг.), на XI Международном симпозиуме по проблемам инженерного мерзлотоведения (Магадан, 2017), на Всероссийских конференциях XX и XXI Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2017, 2019 и 2021 г.), на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2017-2019, 2022 гг.), на Международной конференции 5th European Conference on Permafrost (Chamonix-Mont Blanc, France, 2018), на IV международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятия минерально-сырьевого комплекса в XXI веке (Санкт-Петербург, 2018 г.), на Международной конференции 17th Multiphase Flow Conference & Short Course (Dresden, Germany, 2019), на XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019 г.), на Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле» (Апатиты, 2019), на международной конференции XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM 2020 (Albena, Bulgaria, 2020), на 48-й международной летней научной школе-конференции Advanced Problems in Mechanics (Санкт-Петербург, 2020), на VI Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (Якутск, 2021).

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования в условиях промплощадок строящихся рудников, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программного продукта, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов, разработка рекомендаций для проектирования

искусственного замораживания пород и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту — д-ру техн. наук Льву Юрьевичу Левину за формирование научного направления работы и ценные указания по ней, д-ру техн. наук, профессору Борису Петровичу Казакову и Ларисе Викторовне Казаковой за помощь в выборе структуры и стилистики текста диссертации, коллегам по работе за интересные идеи, подсказанные в ходе обсуждения промежуточных результатов с автором исследовательской работы.

Успешной работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе, поддержка и понимание членов семьи.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 50 научных работ, в том числе 33 публикации в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ, одна монография, 34 публикации в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science (из них шесть публикаций в международных журналах из Q1). Получен один патент, два свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ, а также по результатам проведенных работ издан один внутренний нормативный документ для горнодобывающего предприятия.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав и заключения. Работа изложена на 313 страницах машинописного текста, содержит 118 рисунков и 47 таблиц. Список использованных источников состоит из 360 наименований, в том числе 236 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** работы проведен обзор существующей литературы по вопросам статического и теплотехнического расчета ЛПО, методам и моделям теплопереноса в замораживаемых грунтах и породах, методам расчета механических процессов в деформируемых породах и аэрологических процессов в строящемся стволе, способам мониторинга состояния ЛПО вокруг строящихся шахтных стволов. Выявлены недостаточно проработанные аспекты проектирования искусственного замораживания пород и мониторинга ЛПО, на основании чего сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Проектирование и последующий анализ процесса искусственного замораживания пород основаны на математическом моделировании различных физических процессов, существенным образом влияющих на толщину, сплошность и прочность ЛПО. Поэтому в **главе 2** работы сделаны постановка и обоснование полной математической модели, описывающей протекание термогидромеханических процессов в замораживаемом породном массиве, замораживающих колонках и крепи шахтного ствола, аэрологических процессов в атмосфере строящегося шахтного ствола.

Уравнения баланса массы и энергии для обводненного породного массива:

$$\frac{\partial \{n[\rho_l \varphi + \rho_i (1 - \varphi)]\}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_{tot}}{\partial t} + \mathbf{v}_l \cdot \nabla H_l = \nabla \cdot (\lambda(\varphi) \nabla T), \quad (2)$$

где ρ_l — плотность поровых вод, кг/м³; ρ_i — плотность льда, кг/м³; φ — льдистость, м³/м³; n — пористость массива; \mathbf{v}_l — вектор скорости течения (по Дарси) поровых вод, м/с; H_{tot} — удельная энтальпия обводненного породного массива (порода + вода + лед), Дж/м³; H_l — удельная энтальпия поровых вод, Дж/м³; λ — теплопроводность обводненной породы, Вт/(м·°С); T — температура обводненной породы, °С; t — переменная времени, с; ∇ — векторный набла-оператор.

Скорость (по Дарси) течения поровых вод рассчитывается из уравнения Дарси:

$$\mathbf{v}_l = -\frac{k_r}{\mu_l} \cdot k \nabla p_l, \quad (3)$$

где k_r — относительная проницаемость; k — абсолютная проницаемость породы, м²; μ_l — динамическая вязкость поровых вод, Па·с; p_l — гидростатическое давление, Па.

Зависимость удельной энтальпии H_{tot} и льдистости φ обводненного породного массива от температуры T массива имеет следующий вид:

$$H_{tot}(T) = \begin{cases} \rho_2 c_2 (T - T_{liq}) + \rho_l n L, & T \geq T_{liq} \\ \rho_1 c_1 (T - T_{liq}) + \rho_l n (1 - \varphi) L, & T < T_{liq} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\varphi(T) = \begin{cases} 0, & T \geq T_{liq} \\ 1 - \exp[B(T - T_{liq})], & T < T_{liq} \end{cases}, \quad (5)$$

где ρ_1 — плотность породы в зоне льда, кг/м³; ρ_2 — плотность породы в зоне охлаждения, кг/м³; c_1 — удельная теплоемкость породы в зоне льда, Дж/(кг·°C); c_2 — удельная теплоемкость породы в зоне охлаждения, Дж/(кг·°C); L — удельная теплота фазового перехода поровой воды, Дж/кг; T_{liq} — температура начала кристаллизации поровой воды, °C; B — эмпирический параметр, характеризующий нелинейность фазового перехода.

Относительная проницаемость обводненных пород определяется по известной формуле Ван Генюхтена:

$$k_r(T) = \sqrt{\chi} \left[1 - (1 - \chi^{1/m})^m \right]^2, \quad \chi = 1 - \varphi, \quad (6)$$

где m — эмпирический параметр.

Для замыкания термогидравлической части задачи (1) — (6) вводится уравнение пьезопроводности, которое решается относительно гидростатического давления p_l :

$$(\rho_i - \rho_l) n \frac{\partial \varphi}{\partial t} + [\varphi \rho_i + (1 - \varphi) \rho_l] \frac{\partial n}{\partial p_l} \frac{\partial p_l}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\rho_l k \frac{k_r}{\mu_l} \nabla p_l \right), \quad (7)$$

Термогидравлическая задача (1) — (7) дополняется граничными и начальными условиями, из которых особый интерес представляет условие теплоотдачи через стенку замораживающей колонки:

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha_{fr} (T_{fr} - T) \right]_{\Gamma_{fr}} = 0, \quad (8)$$

где α_{fr} — коэффициент теплоотдачи через стенку замораживающей колонки, Вт/(м²·°C); T_{fr} — температура рассола в замораживающих колонках, °C; Γ_{fr} — граница замораживающими колонками.

Температура рассола T_{fr} в замораживающих колонках в общем случае зависит от времени t , а также от вертикальной координаты z . Эти зависимости необходимо

определять с учетом работы холодильной станции на поверхности и фактической схемы подачи хладоносителя в замораживающую колонку.

Влияние напряженно-деформированного состояния (НДС) массива, полученного в ходе решения механической задачи, на гидравлические и термодинамические процессы осуществляется посредством зависимости пористости массива от объемных деформаций породного массива ε_{vol} :

$$n = n_0 + \alpha_B \varepsilon_{vol}(T) + \frac{1}{N} p_l - 3\alpha_s (\alpha_B - n_0)(T - T_0), \quad (9)$$

где n_0 — начальное значение пористости; α_B — коэффициент Био; ε_{vol} — шаровая часть тензора полных деформаций породного массива; N — тангенциальный модуль Био, Па; α_s — коэффициент теплового расширения сухого скелета.

Расчет деформаций требует совместного решения уравнений равновесия, определяющих и геометрических соотношений линейной теории упругости:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \chi p_l \mathbf{I}, \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\sigma}' = \left(K - \frac{2}{3} G \right) \boldsymbol{\varepsilon}_{vol}^{(e)} \mathbf{I} + 2G \boldsymbol{\varepsilon}^{(e)}, \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(e)} = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(th)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(in)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(cr)}, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right], \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений Коши, Па; \mathbf{g} — ускорение свободного падения, м/с²; ρ — плотность влажного породного массива, кг/м³; $\boldsymbol{\sigma}'$ — тензор эффективных напряжений, Па; K, G — упругие модули, Па; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — тензор полных деформаций; $\boldsymbol{\varepsilon}^{(e)}, \boldsymbol{\varepsilon}^{(th)}, \boldsymbol{\varepsilon}^{(in)}$ и $\boldsymbol{\varepsilon}^{(cr)}$ — соответственно тензоры упругих, температурных, пластических деформаций и деформаций ползучести; \mathbf{u} — вектор перемещений, м.

При расчете предельного состояния ЛПО по условию прочности рассматривается упругопластическая постановка задачи. При наступлении условия $F(\boldsymbol{\sigma}) = 0$ осуществляется переход из зоны линейного упругого деформирования в зону пластического течения. Здесь F — функция текучести, определяемая критерием Мора-Кулона или критерием Друкера-Прагера. При расчете ЛПО по условию пластичности рассматривается вязкоупругое поведение пород в соответствии с общепринятым реологическим законом для грунтов и пород:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(cr)} = \left(\frac{\sigma'_{eq}}{\xi} \right)^{\frac{1}{m}} \tau^\alpha \frac{\mathbf{s}'}{\sigma'_{eq}}, \quad (15)$$

где ξ , m , α – материальные параметры; σ'_{eq} — интенсивность эффективного напряжения σ' , Па; τ — безразмерное время; \mathbf{s}' – девиатор тензора эффективного напряжения σ' .

Механическая задача (10) — (15) также дополняется граничными и (при анализе ползучести) начальными условиями. Граничные условия в механической задаче могут различаться в зависимости от выбранной расчетной схемы. Подробное описание граничных условий при различных схемах дано в **главе 6** работы.

В заданный момент времени $t_s > 0$, когда начинается проходка шахтного ствола, расчетная область видоизменяется — появляется граница Γ_s породного массива со стволом. Задача (1) — (15) дополняется следующими граничными условиями:

$$\left[\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha_s (T_s(t) - T) \right]_{\Gamma_s} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_s} = 0, \quad (16)$$

где $T_s(t)$ — температура воздуха в стволе, °C; α_s — коэффициент теплоотдачи между воздухом и породным массивом, Вт/(м²·°C); $\Gamma_s(t)$ — граница расчетной области со стволом, являющаяся подвижной по времени.

Температура $T_s(t)$ воздуха в стволе в общем случае считается переменной не только по времени, но и по объему ствола. Расчет воздухораспределения в стволе осуществляется посредством решения уравнений Навье-Стокса, неразрывности и баланса энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} E + p \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V}). \quad (19)$$

Здесь \mathbf{V} — вектор скорости воздуха, м/с; ρ — плотность, кг/м³; p — давление, Па; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения, м/с²; E — удельная энергия воздуха, Дж/кг; λ — теплопроводность, Вт/(м·°C); $\boldsymbol{\tau}$ — тензор сдвиговых напряжений, Па.

Система уравнений (17) – (19) движения воздуха дополняется уравнениями сохранения характеристик турбулентности потока, позволяющими рассчитать величину $\boldsymbol{\tau}$. Помимо этого, система уравнений движения воздуха в стволе дополняется соответствующими начальными и граничными условиями.

При решении конкретных практических задач применение системы уравнений (1) — (19) в общем виде нецелесообразно ввиду слабой зависимости различных физических процессов друг от друга, или отсутствия выраженности тех или иных процессов в конкретных практических ситуациях. Целесообразно провести декомпозицию полной математической модели на четыре субмодели: механическую, термодинамическую, гидравлическую и аэрологическую. В работе определены возможные взаимосвязи между соответствующими физическими процессами в разных субмоделях. На рисунке 1 показана схема, на которой показано влияние различных субмоделей друг на друга.

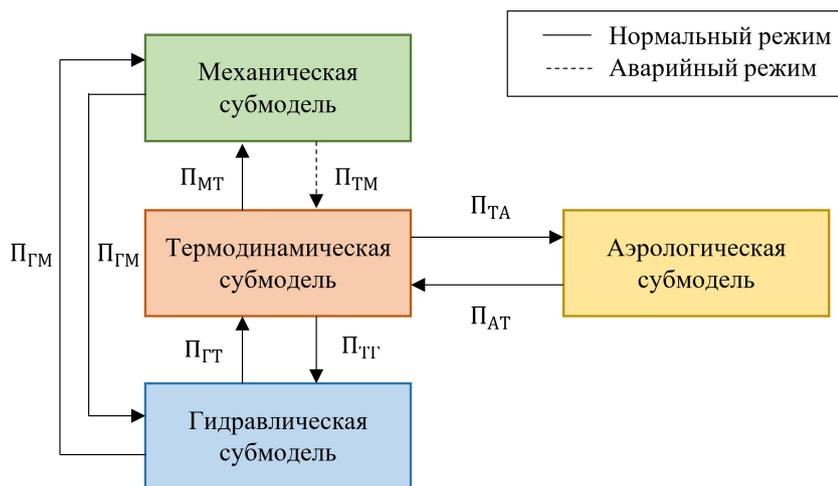


Рисунок 1 — Влияние различных субмоделей друг на друга

Как видно из рисунка, стрелки, указывающие на наличие влияния одних субмоделей на другие, не соединяют попарно все блоки. Более того, для некоторых пар блоков связь является, по большому счету, односторонней.

Условия, при которых возможна декомпозиция полной модели и отдельное рассмотрение каждой из четырех субмоделей, зависит от конкретных условий строительства подземных сооружений. Математически эти условия целесообразно определять набором безразмерных комплексов Π_{XY} , по которым можно количественно оценить соотношение различных физических процессов (см. рисунок 1). В данном случае индексы X и Y обозначают попарно связываемые субмодели. Например, комплекс $\Pi_{ТГ}$, в роли которого обычно выступает число Пекле, связывает термодинамическую и гидравлическую субмодели.

Проведены верификация и валидация построенной модели. На первом этапе проведено сравнение численных расчетов в разработанном программном модуле «Frozen Wall», реализующим термогидравлическую модель, и в программном комплексе Ansys. Расхождения полей температуры в расчетах не превышали 0,2 °С. На втором этапе

проведено сравнение численных расчетов в разработанном программном модуле с результатами натуральных изменений температуры в контрольно-термических (КТ) скважинах при строительстве стволов рудника Петриковского ГОКа, а также с многочисленными результатами лабораторных исследований замораживания пород в фильтрующих породах, проведенных другими авторами. Полученные результаты свидетельствуют о хорошем соответствии модельных и измеренных температур.

Таким образом, по результатам исследований, описанных в **главе 2** работы, вынесено **I научное положение:**

Связанная математическая модель системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь горной выработки – атмосфера горной выработки» с возможностью дифференцированного учета термодинамических и аэрологических процессов, протекающих при искусственном замораживании пород, позволяет проводить комплексный теоретический анализ состояния ледопородных ограждений.

В дальнейшем в работе моделирование и анализ различных физических процессов в формирующемся ЛПО производились в рамках их взаимосвязи с полем температур в породном массиве. Термодинамическая субмодель является наиболее независимой из субмоделей, рассмотренных выше, а потому в первую очередь в **главе 3** работы исследованы теплофизические аспекты проектирования систем искусственного замораживания. Наименее проработанными аспектами проектирования систем искусственного замораживания на сегодня являются: 1) выбор энергоэффективных параметров хладоносителя (температура, расход) с учетом обеспечения несущих и гидроизоляционных свойств ЛПО и 2) обоснование параметров замораживающих колонок (глубина, расстояние между колонками). Исследования данных аспектов проектирования систем искусственного замораживания проведены в настоящей работе.

Одним из основополагающих понятий, определяющих энергоэффективность системы замораживания, является величина Ψ относительных земных теплопритоков к границе ЛПО при работающей замораживающей станции – т.е. отношение суммарных земных теплопритоков $Q_{ЗЕМ}$ (Дж) на границе ЛПО к теплосодержанию ЛПО $Q_{ЛПО}$ (Дж):

$$\Psi = \frac{Q_{ЗЕМ}}{Q_{ЛПО}}. \quad (20)$$

В настоящей работе проведено исследование величины относительных земных теплопритоков при формировании ЛПО шахтных стволов. В ходе многопараметрического численного моделирования формирования ЛПО на

разработанной модели получено, что относительные земные теплопритоки зависят от теплофизических свойств породного массива (теплопроводность, теплоемкость, содержание воды, начальная температура массива), от технологических параметров работы замораживающей станции (температура хладоносителя) и от времени. В первые 1-3 месяца работы замораживающей станции относительные земные теплопритоки существенно зависят от времени (см. рисунок 2). Убывание теплопритоков со временем происходит по степенному закону $t^{-1/2}$. По прошествии 5-8 месяцев величина относительных земных теплопритоков выходит на стационарное значение, которое варьируется в широком диапазоне: от 0,35 до 1,3.

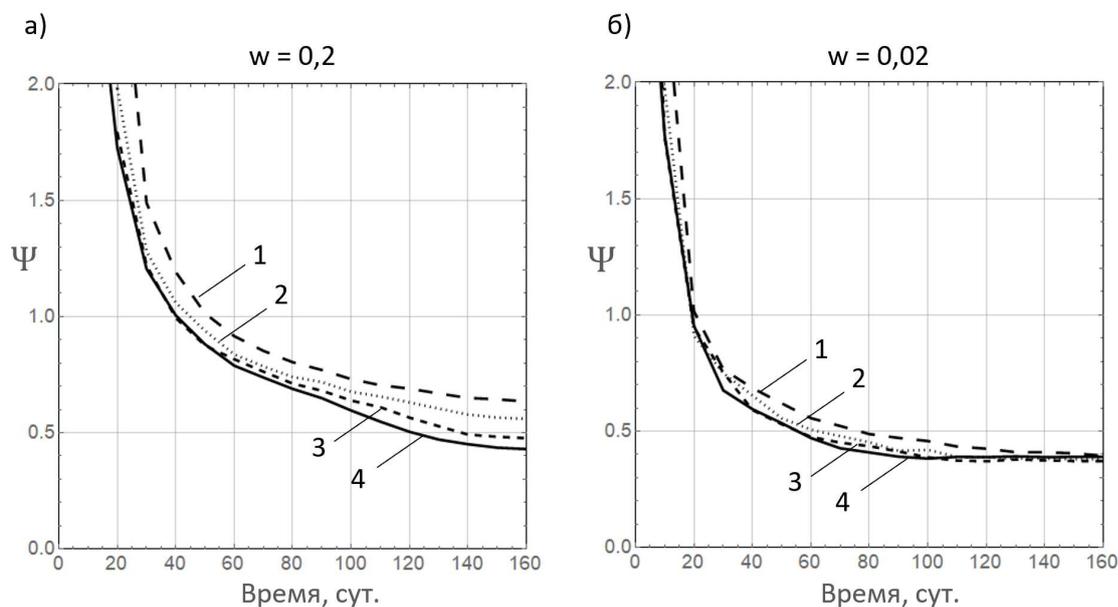


Рисунок 2 — Зависимость земного теплопритока от времени при различных температурах хладоносителя в замораживающих колонках: 1 — $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 — $T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 — $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Также получена формула для оценки стационарного значения относительных земных теплопритоков к границе ЛПО:

$$\Psi = 1,82 \cdot \left(\frac{T_0 - T_{liq}}{T_{liq} - T_{fr}} \right)^{0,85} \cdot (0,43 + 2,4w^{0,8}), \quad (21)$$

где w — массовая влажность массива, кг/кг; T_0 — начальная температура массива, $^{\circ}\text{C}$.

С использованием полученной информации о земных теплопритоках проведено многопараметрическое численное моделирование стадий активного и пассивного замораживания породного массива. Для стадии пассивного замораживания решалась задача оптимизации температурной кривой хладоносителя, при которой выполнялось бы условие поддержание фиксированной толщины ЛПО, равной проектному значению. В

результате получено, что температура хладоносителя на стадии пассивного замораживания должна монотонно возрастать с течением времени по степенному закону с показателем степени около $-0,2$. Этот закон справедлив в широком диапазоне возможных теплофизических параметров замораживаемых пород, возможных параметров хладоносителя, циркулирующего в замораживающей колонке (см. рисунок 3а).

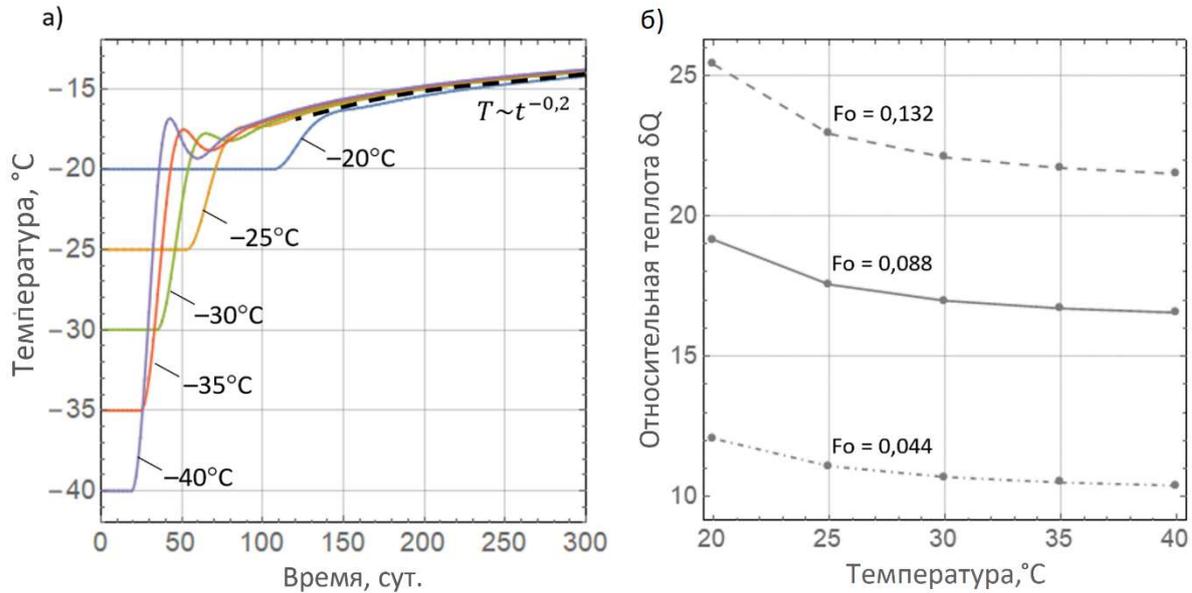


Рисунок 3 — Временная динамика температуры хладоносителя при различных начальных температурах хладоносителя (а) и зависимость относительной теплоты от температуры хладоносителя на стадии активного замораживания (б), Fo – число Фурье

Также получено, что выбор величины температуры хладоносителя в фазе активного замораживания практически не влияет на суммарную энергоэффективность системы замораживания на фазах активного и пассивного замораживания (см. рисунок 3б). Следовательно, основными критериями выбора температуры хладоносителя на стадии активного замораживания являются условия по прочности и ползучести ЛПО, подробно исследованные **в главе 6** работы. Относительная теплота δQ на рисунке 3б равна отношению суммарной теплоты, отобранной из массива за всё время его замораживания, и полезной теплоты, затраченной на формирование ЛПО.

При этом на стадии пассивного замораживания повышение температуры ЛПО не может быть безграничным – максимально допустимая отрицательная температура хладоносителя определяется исходя из условия сохранения гидроизоляционных свойств ЛПО после возведения бетонной крепи и до момента ее гидроизоляции. Данный вопрос исследован **в главе 4** работы.

Проведен теоретический анализ динамики ЛПО в фазе пассивного замораживания в нормальном и аварийном режимах работы системы замораживания. Аварийный режим работы системы связан с выходом из строя одной из замораживающих колонок. Получено, что при переходе в фазу пассивного замораживания горных пород динамика толщины ЛПО сильно зависит от того, каким способом определяются границы ЛПО: по изотерме фактического замерзания поровой воды T_{sd} или по изотерме T_d , соответствующей лабораторным измерениям прочности замораживаемых горных пород ($-8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Если толщина ЛПО, рассчитанная по изотерме фактического замерзания воды, сохраняет свою положительную динамику, то толщина ЛПО, рассчитанная по изотерме $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, может существенно уменьшаться (см. рисунок 4).

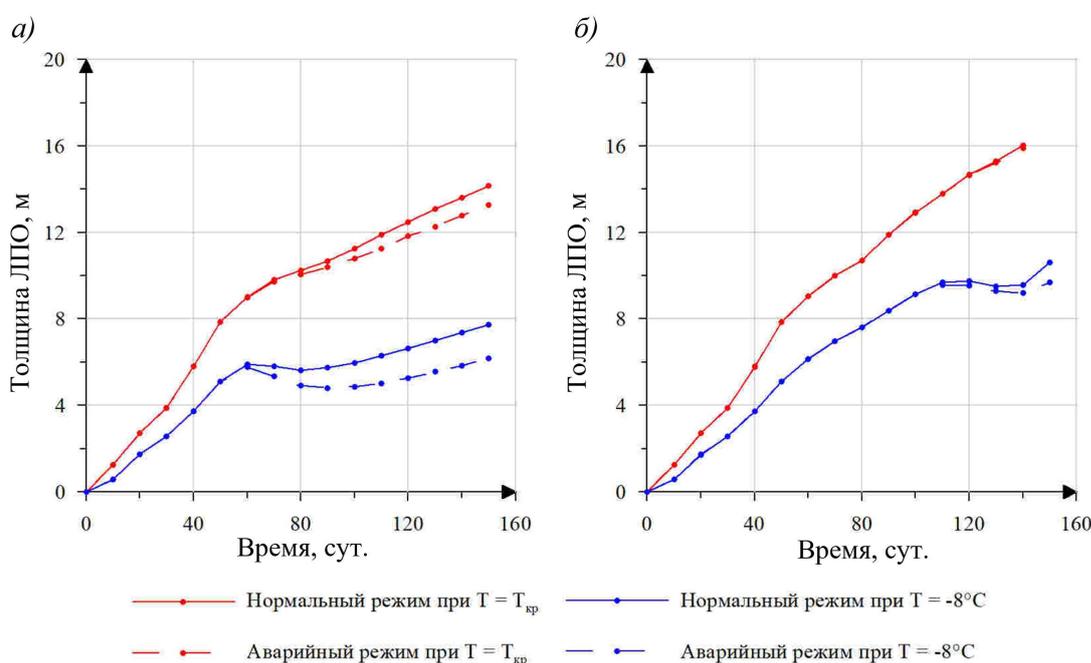


Рисунок 4 — Толщина ЛПО для слоя глины по изотермам T_{sd} и T_d в зависимости от времени для нормального и аварийного режимов работы системы замораживания: а) — 50 суток активного замораживания, б) — 100 суток активного замораживания

При анализе толщины ЛПО по изотерме фактического замерзания поровой воды не представляется возможным оценить опасность аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя замораживающих колонок, т. к. эта толщина ЛПО сохраняет положительную динамику. Важным обстоятельством является то, что при расчете толщины ЛПО по изотерме фактического замерзания воды подразумевается, что средняя температура всего ЛПО должна быть около $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако данное условие, как было показано в работе, может нарушаться в пассивном режиме замораживания как в штатном, так и в аварийном режимах работы. Поэтому допустимы два варианта расчет

границ ЛПО: 1) по изотерме T_d , и 2) по изотерме T_{sd} с учетом контроля средней температуры ЛПО.

Анализ изменения толщины ЛПО при различных расстояниях между замораживающими колонками показал, что для наиболее распространенных расстояний между колонками от 1,1 до 1,3 м требуется соблюдать ограничения по длительности активного замораживания для предотвращения критического уменьшения толщины ЛПО на фазе пассивного замораживания, либо уменьшать расстояние между замораживающими колонками. В этом случае будет обеспечено сохранение положительной динамики роста толщины ЛПО. Для рассмотренного в работе слоя глины и расстояний между колонками от 1,1 до 1,3 м минимальное время активного замораживания составляет около 4,3 месяца. Представленный вывод важен ввиду имеющегося в настоящее время тренда на уменьшение времени активного замораживания породного массива с целью ускорения строительства шахтных стволов.

Проведено исследование влияния вертикальных земных теплопритоков на толщину ЛПО в наиболее глубоком замораживаемом слое пород. Рассмотрены различные заглубления замораживающих колонок в водоупорный слой. Получено, что в случае, когда водоупорный слой является более теплопроводным по сравнению с вышележащим водопроводящим слоем (последним замораживаемым слоем) пород, заглубление замораживающих колонок в водоупорный слой по теплофизическому фактору достаточно осуществлять на 2 м. В случае, когда водоупорный слой является менее теплопроводным по сравнению с вышележащим водопроводящим слоем, необходимо заглублять замораживающие колонки на глубину 5 м.

По результатам исследований, описанных в **главе 3**, сформулировано **II научное положение**:

Определение технологических параметров систем замораживания посредством численного многопараметрического моделирования физических процессов в породном массиве и их оптимизации по критериям безопасности и энергоэффективности позволяет уменьшить сроки строительства горных выработок в сложных гидрогеологических условиях и обеспечить поддержание проектных параметров ледопородного ограждения в течение всего периода проходки, крепления и гидроизоляции шахтного ствола.

В **главе 4** работы рассмотрены вопросы, связанные с движением поровых вод при искусственном замораживании пород. Для этого к ранее рассмотренной термодинамической субмодели добавлена гидравлическая субмодель.

Движение свободных (не связанных) подземных вод в породах обусловлено действием силы тяжести и происходит при неоднородном уровне вод в пределах рассматриваемого участка (градиент гидростатического давления), либо при неоднородном распределении температуры (разница плотности воды). В первом случае имеет место вынужденная конвекция подземных вод, а во втором — естественная (свободная) конвекция.

Прежде всего, рассмотрена задача о вынужденной конвекции в горизонтальном слое породного массива. Рассмотрен случай плоскопараллельного течения вод на удалении от контура замораживания (рисунок 5а). В ходе многопараметрического численного расчета тепломассопереноса в слое песчаника получено, что влияние течения подземных вод на толщину ЛПО начинается при скоростях фильтрации около 50 мм/сутки (см. рисунок 5б). При этом влияние течения подземных вод на поле температур породного массива начинается раньше, при скоростях фильтрации 10-25 мм/сутки.

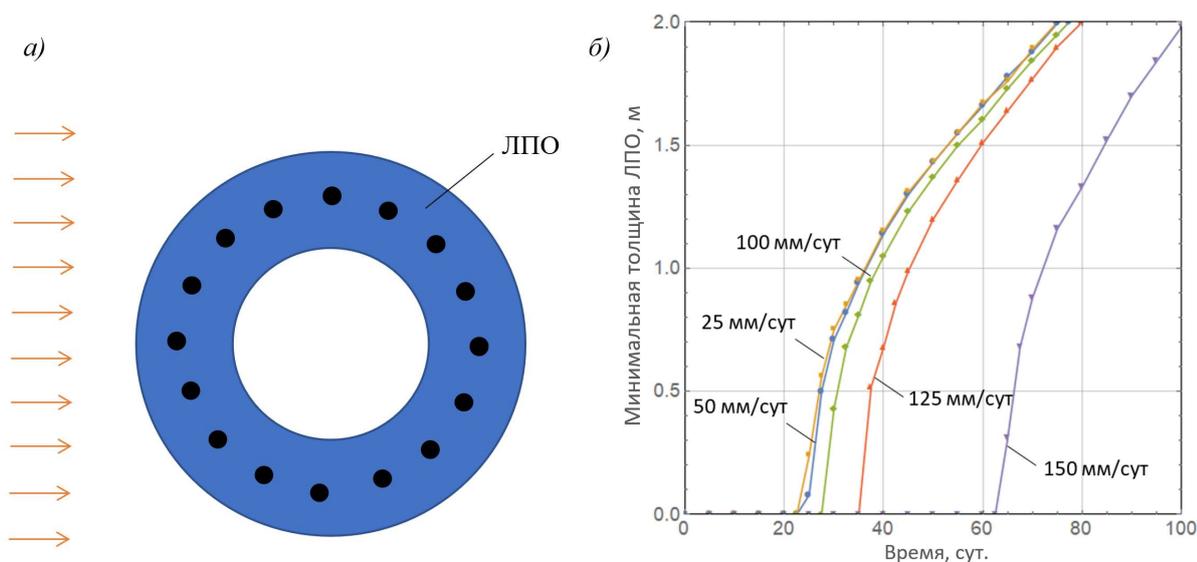


Рисунок 5 — Расчетная схема (а) и зависимость минимальной толщины ЛПО от времени при различных скоростях фильтрации в горизонтальной плоскости пласта

Определены механизмы динамики ЛПО при увеличивающейся скорости фильтрации подземных вод: смещение, формоизменение и потеря сплошности. При низких скоростях фильтрации (числа Пекле $Pe < 0,5$) преобладающим является механизм смещения ЛПО вдоль по потоку подземных вод; толщина ЛПО при этом сохраняется. При средних скоростях фильтрации (числа Пекле $0,5 < Pe < 1,5$) происходит ярко выраженное формоизменение ЛПО, толщина которого начинает зависеть от скорости фильтрации. При высоких скоростях фильтрации (числа Пекле $Pe > 1,5$), как правило, происходит потеря сплошности (деконсолидация) ЛПО.

Определена поправка на толщину ЛПО, которую необходимо закладывать при наличии течения подземных вод. Поправка на толщину ЛПО для исследованного слоя песчаника рассчитывалась исходя из рисунка 5б. Поправка будет равна величине уменьшения толщины ЛПО, взятой в определенный момент времени (проектному времени активного замораживания породного массива).

Показано, что при высоких скоростях фильтрации смыкание ЛПО может не произойти, поэтому необходимо применять другие мероприятия. Например, уменьшение температуры хладоносителя в колонках, увеличение расхода хладоносителя, бурение дополнительных замораживающих скважин и пр.

Далее в главе исследована задача о максимальной допустимой температуре ЛПО на стадии пассивного замораживания в рамках анализа плоскорадиального течения через ЛПО, обладающее ненулевой гидравлической проницаемостью. Получена формула, отражающая взаимосвязь данной температуры с боковым гидростатическим давлением P и допустимым водопритоком в строящийся ствол $Q_{дон}$:

$$P = \frac{Q_{дон} \mu_l \ln(1 + E/R)}{2\pi LK \sqrt{\chi(T)} \left[1 - (1 - \chi^{1/m}(T))^m \right]^2}, \quad (22)$$

где L — длина участка ствола, м; R — радиус внутренней границы ЛПО, м; E — толщина ЛПО, м; K — абсолютная проницаемость пород, м².

Исследовано влияние естественной конвекции подземных вод на процесс искусственного замораживания породного массива. Получено, что при наличии естественной конвекции в замораживаемом породном массиве возникают отклонения изотерм температуры от идеально вертикального положения, искажение формы фронта фазового перехода. Такие искажения возрастают с течением времени. На рисунке 6 представлены поля безразмерных температуры T' и функции тока ψ' , векторные поля скоростей Дарси в вертикальном сечении породного массива в безразмерных пространственных координатах R' и Z' .

Определены значения безразмерных чисел Рэлея (Ra , Ra_p), Дарси (Da) и Фурье (Fo) для водонасыщенного породного массива

$$Fo = \frac{0,4}{Ra_p^{0,07}} - 0,3 = \frac{0,4}{(Ra \cdot Da)^{0,07}} - 0,3 \quad (23)$$

при которых происходит существенное изменение положения фронта фазового перехода по высоте вследствие влияния естественной конвекции подземных вод.

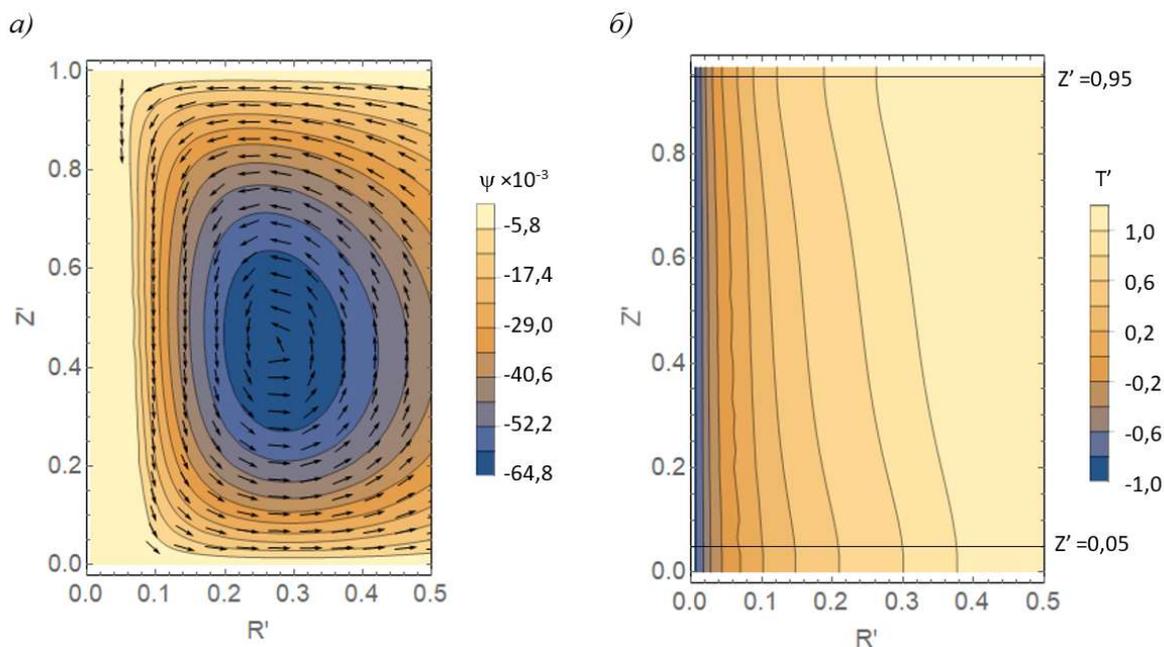


Рисунок 6 — Численное решение задачи для числа Рэлея $Ra_p = 7$: а) – безразмерная функция тока и векторное поле скоростей Дарси, б) – безразмерная температура

Проведенные численные расчеты позволили выделить три различных режима естественной конвекции в обводненном породном массиве в условиях искусственного замораживания (см. рисунки 6 — 7):

- режим одной конвективной ячейки с нисходящим потоком поровых вод вблизи границы фазового перехода и восходящим потоком на удалении от фронта фазового перехода (при начальной температуре породного массива более $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- режим с двумя конвективными ячейками с противоположными направлениями циркуляции поровых вод (при начальной температуре массива от $+4$ до $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- режим одной конвективной ячейки с восходящим потоком поровых вод вблизи границы фазового перехода и нисходящим потоком на удалении от фронта фазового перехода (при начальной температуре породного массива менее $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Показано, что при переходе на пассивный режим замораживания и повышении температуры хладоносителя происходит резкий рост максимальной скорости фильтрации поровых вод. Рост связывается с тем, что в начале пассивного замораживания граница фазового перехода в течение определенного интервала времени движется влево (к замораживающей колонке) и происходит уменьшение зоны льда. Появляется широкая область незамороженного массива с температурой, близкой к нулю, тем самым увеличивается ширина зоны нисходящей фильтрации поровой воды (от кровли слоя к его почве). Эквивалентное гидравлическое сопротивление этой зоны оказывается ниже вследствие большей ее ширины, что интенсифицирует процесс фильтрации.

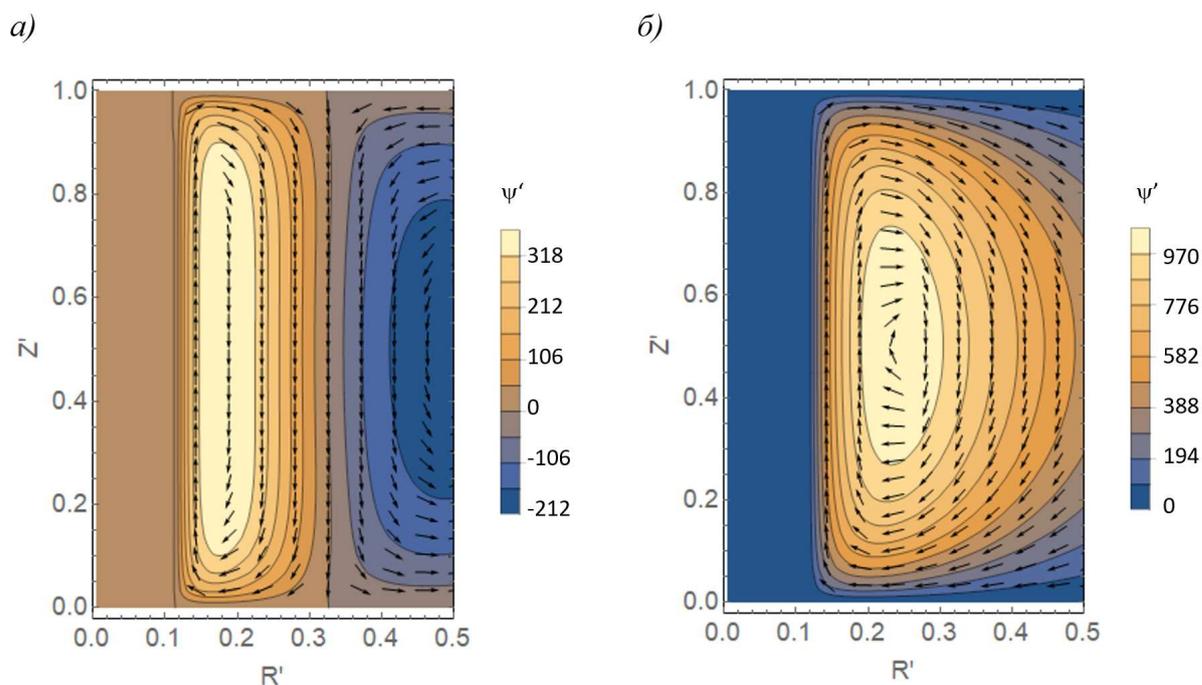


Рисунок 7 — Безразмерная функция тока и векторное поле скоростей Дарси: а) – $Ra_p = 17,5$, $T_0 = +5$ °C б) – $Ra_p = 14$, $T_0 = +4$ °C

В аспекте практического применения термогидродинамическая модель замораживаемого породного массива позволила интерпретировать результаты натуральных измерений уровня подземных вод в гидронаблюдательных скважинах при строительстве ствола № 1 рудника Петриковского ГОКа с использованием искусственного замораживания, а также объяснить anomalous поведение распределения температур в контрольных скважинах строящегося скипового ствола Дарасинского рудника.

По итогам проведенных исследований фильтрации поровых вод, описанных в **главе 4**, сформулировано **III научное положение**:

Количественная оценка обеспечения проектных параметров ледопородного ограждения в условиях высокой обводненности и гидравлической проводимости породного массива должна осуществляться на основании анализа закономерностей фильтрации подземных вод в замораживаемом породном массиве как в режиме вынужденной, так и в режиме свободной конвекции.

В условиях, когда строительство шахтного ствола осуществляется с использованием специального способа искусственного замораживания горных пород, крепь ствола может иметь температуру близкую к 0 °C или ниже. Это неблагоприятно с точки зрения вентиляции строящегося ствола, поскольку приводит к локальному понижению температуры воздуха, к образованию отрицательного градиента температуры воздуха по радиусу и по высоте ствола, тем самым повышая риск

возникновения тепловой (свободной) конвекции в стволе. Проведенные в работе экспериментальные наблюдения подтверждают возможность таких явлений.

Оценка возможности возникновения тепловой конвекции в строящемся стволе и анализ ее влияния на температурное поле замороженных пород, окружающих ствол, исследованы в главе 5 работы. Анализ проводился с использованием двух взаимосвязанных субмоделей – термодинамической и аэрологической. С учетом слабого влияния гидрогеологических и механических процессов на особенности проветривания строящегося ствола в нормальном режиме работы, соответствующие субмодели не рассматривались.

В результате многопараметрического численного моделирования определено, что коэффициент теплоотдачи на границе между крепью ствола и воздухом существенно изменяется по высоте ствола, что связано с вариацией поперечного профиля скорости воздушного потока вдоль вертикальной координаты (оси ствола) и затуханием вращательной компоненты вектора скорости по мере удаления от забоя ствола. Установившееся поле скоростей воздушного потока на удалении от забоя ствола также существенно неравномерно по высоте при наличии температурного перепада между стенкой ствола и воздухом. А начиная с определенной величины температурного перепада радиальный профиль скорости воздуха в стволе оказывается знакопеременным.

Получено, что свободная конвекция оказывает существенное влияние на тепло- и массоперенос в воздушном пространстве ствола в случае, когда стенки крепи ствола имеют температуру, меньшую, чем температура воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода у забоя ствола. На рисунке 8 показаны распределения безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта Nu) без учета и с учетом тепловой конвекции. Соответствующие кривые Γ_1 и Γ_2 строились вдоль стенки ствола с диаметрально-противоположных сторон. Образование конвективных ячеек в сечении ствола приводит к дополнительному увеличению величин скорости воздушного потока в стволе. Вследствие этого коэффициент теплоотдачи на границе между крепью ствола и воздухом оказывается существенно выше по сравнению с расчетом без учета свободной конвекции.

В результате многопараметрического численного моделирования предложена формула для расчета размерного коэффициента теплоотдачи на границе «воздух-крепь» как функции средней скорости воздуха в стволе V_0 , диаметра ствола d и перепада температур ΔT между воздухом на выходе из воздухопровода и крепью ствола:

$$\alpha = 0,021 \cdot \varepsilon \cdot \Delta T^{0,6} \cdot d^{1,8} \cdot V_0^{0,65}. \quad (24)$$

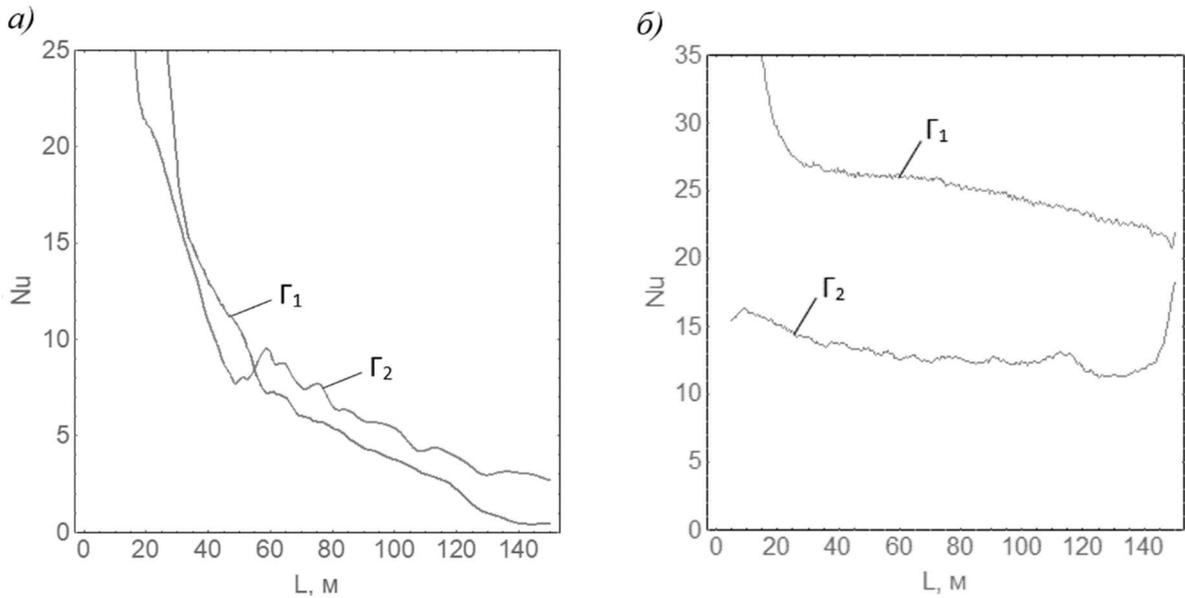


Рисунок 8 — Распределение безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu без учета (а) и с учетом (б) тепловой конвекции (при числе Рэлея $Ra = 1,16 \cdot 10^{11}$)

Получено, что существенное изменение поперечного профиля скоростей воздушного потока и появление устойчивых частично-возвратных течений, интенсифицирующих процесс теплопередачи, происходят при числах Рэлея, имеющих порядок 10^9 . Число Рэлея в данном случае характеризует безразмерную разницу температур воздуха в стволе.

Появление устойчивых частично-возвратных течений опасно с той точки зрения, что в этом случае возможно проникновение холодных воздушных масс в рабочую зону вблизи забоя строящегося ствола. Для определения условий возникновения частично-возвратных течений воздуха в стволе, характеризующихся критическим числом Рэлея, предложены формулы:

$$Ra_{cr}^* = \frac{Ra_{cr}}{10^{10}} = 0,19 Re^{1/4} - 1,19, \quad (25)$$

$$V_{min} = \frac{\nu}{R} \left(\frac{g \beta \Delta T R^3}{0,19 \nu \chi \cdot 10^{10}} + 6,26 \right)^4, \quad (26)$$

где Re — число Рейнольдса воздушного потока; R — радиус ствола, м; β — коэффициент теплового расширения воздуха, $1/^\circ C$; g — ускорение свободного падения, m/c^2 ; ν и χ — соответственно ламинарные кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха, m^2/c .

Формула (26) является размерным аналогом формулы (25), изображенной на рисунке 9. А скорость V_{min} в (26) можно интерпретировать как минимально допустимую

скорость воздуха в шахтных стволах, при которой исключаются возвратные потоки воздуха и неконтролируемая рециркуляция воздуха. Эта функция может использоваться при проектировании систем вентиляции шахт в случае низких скоростей воздуха и значительного перепада температур ΔT между воздухом и окружающими породами.

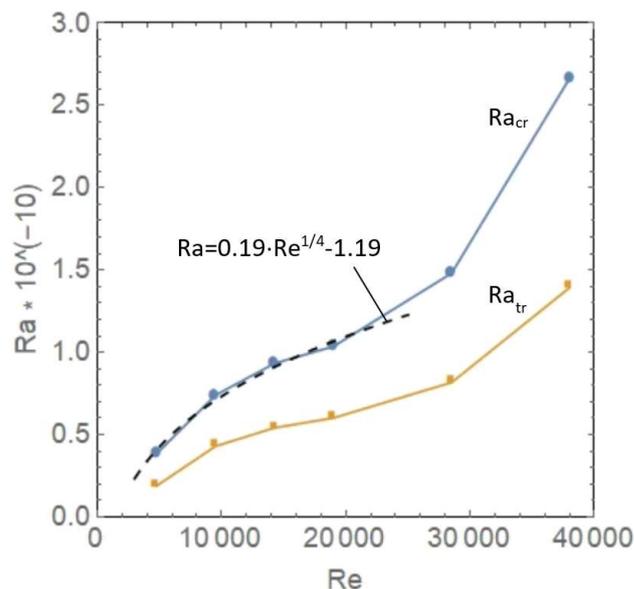


Рисунок 9 — Зависимость чисел $Ra_{кр}$ и $Ra_{вп}$ от числа Re

Сопряженный анализ теплообменных процессов в замороженном породном массиве и воздухе, движущемся по шахтному стволу, позволил определить формулу для оценки влияния теплового потока со стороны воздуха на положение фронта фазового перехода в породном массиве внутри контура замораживания:

$$Bi_s = \frac{-Bi_b T_b}{T_s \left[\frac{\varepsilon}{r_s} Bi_b (T_s - T_b) - Bi_b \ln \left(\frac{r_b}{r_s} \right) - 1 \right]}. \quad (27)$$

Здесь Bi_s и Bi_b — числа Био, характеризующие соотношение процессов теплопередачи через соответствующие границы зоны породного массива («массив-крепь» и «массив-колонка») и теплопроводности в породном массиве; T_b — температура хладоносителя в замораживающей колонке, °C; T_s — температура воздуха в стволе, °C; r_s — радиус стенки шахтного ствола, м; ε — максимальное допустимое расстояние от стенки шахтного ствола до фронта фазового перехода, м.

Формула (27) позволяет вычислить такое значение коэффициента теплопередачи от воздуха к породному массиву, при котором фронт фазового перехода отстоит от стенки шахтного ствола на заданное расстояние ε при установившихся тепловых процессах внутри контура замораживания. Данная формула использована при расчете

предельных значений температуры воздуха в скиповом стволе калийного рудника Гремячинского ГОКа, при которых тепловой поток от воздуха начинает оказывать существенное влияние на ЛПО, поддерживаемое вокруг эксплуатируемого скипового ствола до решения технических проблем с гидроизоляцией ствола.

Результаты проведенных и описанных в **главе 5** научных исследований легли в основу **IV научного положения**:

Параметры движения воздушных потоков в вертикальной строящейся горной выработке, рассчитанные с учетом наличия градиента температур и переменной плотности воздуха, позволяют повысить адекватность моделирования теплообмена между крепью ствола и воздухом и обеспечить надежное проветривание строящейся горной выработки.

При проектировании замораживания пород статический (механический) расчет ЛПО предшествует теплотехническому, однако в настоящей работе статический расчет рассматривается в **главе 6** после анализа тепломассопереноса в замораживаемых породах, проведенного в **главах 3 и 4**. Такой порядок проведения исследования обусловлен тем, что распределение НДС в ЛПО и его прочность в конечном счете зависит от температурного поля и распределения влажности в породах, в то время как поле температур, как правило, практически не зависит от НДС ЛПО. Наименее проработанными вопросами статического расчета на сегодняшний день являются: 1) анализ влияния вертикального давления на ползучесть ЛПО; 2) учет конечной высоты заходки и корректного критерия разрушения горных пород в формуле для толщины ЛПО по условию прочности; 3) учет влияния неоднородности поля температуры на расчетные формулы для толщин ЛПО по условиям прочности и ползучести.

В ходе исследования закономерностей ползучести ЛПО предложена новая схема расчета НДС в ЛПО, учитывающая наличие незамороженного породного массива под дном заходки и вокруг ледопородного ограждения (см. рисунок 10). На внешней боковой поверхности расчетной области задано нулевое перемещение. На нижней границе вертикальные перемещения равны нулю. На верхней границе задавалась равномерная нагрузка из-за веса вышележащих пород, а на линии, являющейся граничной со стенкой шахтного ствола, задавалось полное закрепление. При этом на гранях, соответствующих стенке шахтного ствола и дну заходки, задавалось условие нулевой нагрузки. На поверхностях симметрии принималось, что перемещение по нормали к ним равны нулю.

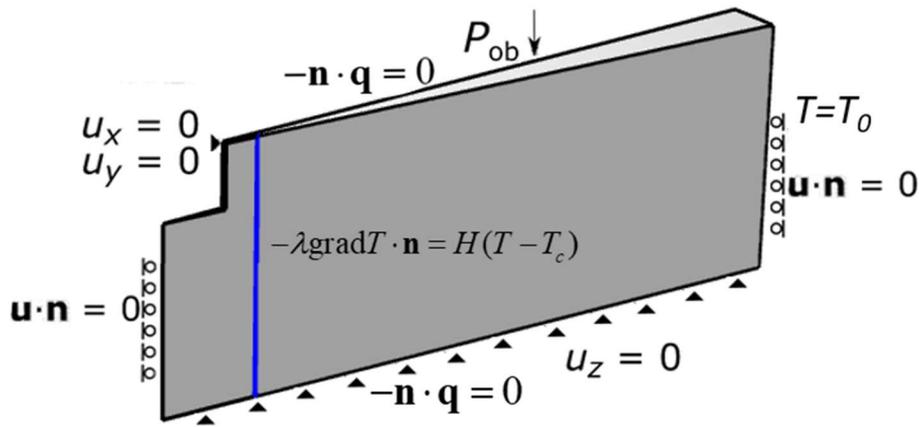


Рисунок 10 — Схема для расчета НДС в замораживаемом массиве и граничные условия; синей линией показана замораживающая колонка

С использованием термодинамической и механической субмоделей проведен анализ требуемой толщины ЛПО по условию ползучести в рамках принятой расчетной схемы. Профили температуры породного массива принимались на момент достижения ЛПО проектной толщины, а зависимости физико-механических свойств пород от температуры, реологические параметры в (15) приняты на основании проведенных лабораторных тестов на образцах пород для условий Дарасинского калийного рудника (респ. Беларусь). Для описания полной зависимости проектной толщины ЛПО от нагрузки P была предложена следующая модификация формулы С.С. Вялова для расчета толщины ЛПО по предельным деформациям:

$$E = R \left\{ \left[1 + g(P) \frac{(1-m)P}{A} \left(\frac{h}{R} \right)^{1+m} \left(\frac{R}{\Delta} \right)^m \right]^{\frac{1}{1-m}} - 1 \right\}, \quad (28)$$

где E — толщина ЛПО; R — внутренний радиус ЛПО, Δ — предельно-допустимые перемещения внутренней стенки ЛПО, м; h — глубина заходки, м.

Формула (28) применима для расчета проектных толщин ЛПО для различных типов пород по критерию предельно-допустимых деформаций (расчет на ползучесть) в интервале глубин до 500 м. Она получена в результате многопараметрического численного моделирования деформирования ЛПО и оптимизационного поиска такой толщины ЛПО, при которой его внутренняя стенка перемещается к центру ствола не более, чем на величину Δ . Далее для классической формулы С.С. Вялова подбиралась такая функция g , чтобы наилучшим образом удовлетворить численным кривым, принимаемым за эталон. Материальная функция $g(P)$ внесена вместо коэффициента

защемления ξ , присутствующего в классической формуле, и зависит от величины нагрузки, действующей на ЛПО:

$$g(P) = a_1 P^2 + a_2 P + a_3, \quad (29)$$

где a_1 , a_2 и a_3 — параметры материала. Значения этих параметров для алевролита, супеси, глины и мела приведены в таблице 1. Высота заходки принята равной 5 м.

Таблица 1 — Значения материальных параметров, входящих в функцию (29)

Породный слой	Коэффициенты при g			f
	$a_1 \cdot 10^{13}$	$a_2 \cdot 10^7$	a_3	
Алевролит (39.7-50.1м)	2,10	-2,85	0,427	0,5
Супесь (83-90.8м)	-0,89	3,31	0,514	
Мел (90.7-111.8м)	1,42	-5,73	1,269	
Глина (145.8-152м)	0,57	-3,03	0,846	

Проведен сравнительный анализ полученной формулы (28) с классической формулой С.С. Вялова ($g = \text{const}$). Результаты сравнения представлены на рисунке 11. По оси x отложено безразмерное внешнее давление P' , связанное с размерным давлением согласно линейной зависимости $P' = kP$. Параметр k равен 0,69 МПа для алевролита, 1,16 МПа для супеси, 1,35 МПа для мела и 2 МПа для глины. Из рисунка 11 видно, что относительное рассогласование между толщинами ЛПО по предложенной формуле (28) и по формуле С.С. Вялова достигает 70 %. Отсюда сделан вывод о важности учета таких факторов как вертикальное давление на ЛПО, неоднородность поля температуры и наличие породного массива ниже забоя ствола.

В дополнение к этому в работе исследована зависимость толщины ЛПО по условию ползучести от двух факторов (вертикальной нагрузки на ЛПО и неоднородности поля температуры) по-отдельности. Показано, что пренебрежение вертикальной нагрузкой может привести к завышению требуемой толщины ЛПО более чем на 50 %. При этом неоднородность поля температур начинает существенно влиять на расчетное значение толщины ЛПО только когда максимальная разница температур в объеме ЛПО начинает превышать заданную критическую величину, зависящую от типа пород. Минимальное значение критической величины разницы температур в объеме ЛПО составляет 12 °С и получено для песка.

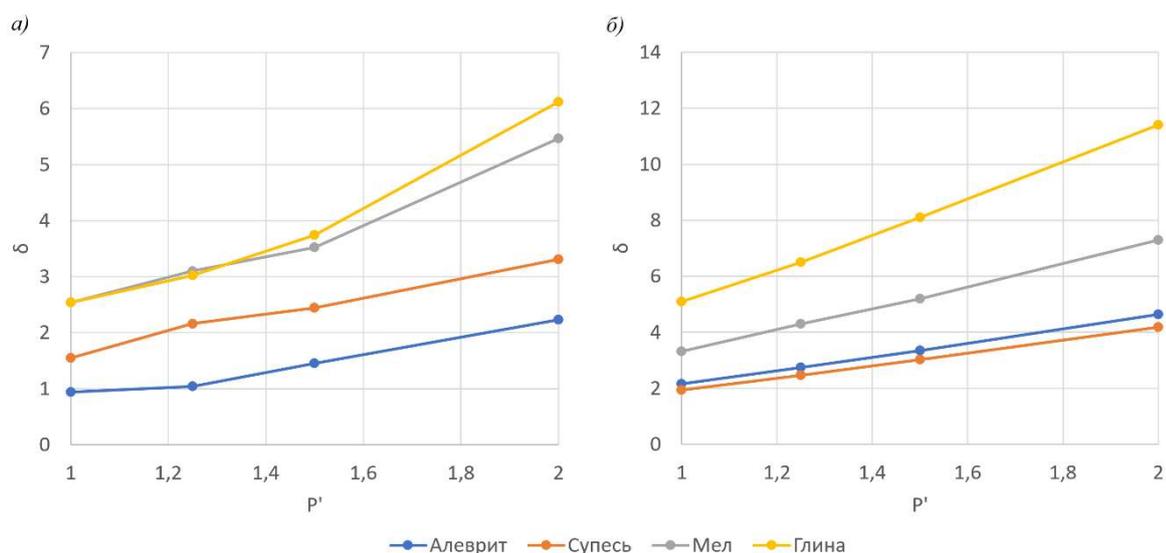


Рисунок 11 — Зависимости проектной толщины ЛПО по условию ползучести от безразмерной величины внешнего давления P' согласно предложенной формуле (а) и классической формуле С.С. Вялова (б)

На следующем этапе исследования проведена оценка несущей способности ЛПО по условию прочности. Использовалась расчетная схема, представленная на рисунке 10, дополнительно учитывалось НДС в незамороженных породах, окружающих ЛПО. Механическая субмодель (10) — (14) дополнена условием текучести и ассоциированным законом пластического течения:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{(in)} = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \quad (30)$$

$$F = |\tau|_m - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi - c, \quad (31)$$

где $F(\boldsymbol{\sigma})$ — функция (критерий) текучести, определяющая пределы упругого поведения замороженного грунта, $d\lambda$ — пластический множитель, τ_m — максимальное касательное напряжение на площадке с нормалью \mathbf{n} , σ_n — нормальное напряжение, действующее на этой же площадке; φ — угол внутреннего трения пород, °; c — сцепление пород, Па.

На примере проведенных расчетов для проекта замораживания пород калийного рудника показано, что проектные значения толщины ЛПО по условию прочности могут быть выше толщин ЛПО по условию ползучести только для относительно неглубоких слоев пород (до 150 м), в то время как при глубинах более 50 м определяющим фактором при расчете толщины ЛПО является ползучесть.

Проведен анализ корректности принимаемого в классических формулах допущения об однородности распределения температур и прочностных свойств в объеме замороженных пород. Анализ проведен посредством численного решения сопряженной

термомеханической задачи. Получено, что статический расчет ЛПО с учетом неоднородного поля температур приводит к более высокому значению толщины ЛПО, чем в случае однородного поля температур. Предложена формула для расчета требуемой толщины ЛПО E с учетом неоднородности поля прочностных свойств в объеме ЛПО, деформирования окружающих незамороженных пород и конечной высоты заходки h :

$$E = a \left(1 + \frac{P(\Lambda - 1)}{\Lambda} K_h K_T K_u \right)^{\frac{1}{\Lambda - 1}} - a, \quad (32)$$

$$K_h = \frac{1}{1 + \xi \frac{(1 - \nu)a^2}{4h^2}}, \quad K_T = 1 + \frac{\Lambda(\Lambda + 1)P^2 \Delta_c}{96\bar{\Lambda}_{\text{сред}}^3}, \quad K_U = \frac{2 - \bar{\Upsilon}}{\Upsilon + 1} \quad (33)$$

где Λ и $\bar{\Lambda}$ — параметры критерия Мора-Кулона замороженной породы, записанного через главные напряжения; Υ и $\bar{\Upsilon}$ — параметры критерия Мора-Кулона незамороженной породы; a — внутренняя граница ЛПО, м; K_h — коэффициент, учитывающий конечность высоты заходки; K_T — коэффициент, учитывающий неоднородность поля температур; K_u — коэффициент, учитывающий НДС незамороженных пород; P — боковое давление, Па; $\Delta_c = c_{\text{max}} - c_{\text{min}}$ — разница между максимальным и минимальным сцеплениями пород в объеме ЛПО, Па; $\xi \geq 1$ — коэффициент, характеризующий влияние пластического течения.

По итогам исследований предельного равновесия ЛПО и его ползучести сформулировано **V научное положение**:

Расчетные толщины ледопородных ограждений по критериям предельного равновесного состояния и предельных деформаций замороженных пород существенным образом зависят от таких физических факторов как вертикальная нагрузка вышележащих пород, напряженно-деформированное состояние окружающих незамороженных пород, фактическая неоднородность поля температур и фактические технологические параметры заходки.

В **главе 7** рассмотрены вопросы проектирования систем мониторинга состояния замороженного массива. Рассматривались такие непроработанные на сегодняшний день вопросы мониторинга искусственного замораживания пород как выбор мест расположения и количества контрольно-термических (КТ) скважин в условиях комплексного мониторинга с применением локальных и интегральных методов, интерпретация поля температур в породном массиве по несовместным данным

измерений в КТ скважинах и показаний датчиков системы замораживания, погрешность показаний КТ скважин.

Теплофизическая модель породного массива содержит ряд параметров, значения которых необходимо задать для получения численного решения. Теплофизические параметры пород, определенные в лабораторных условиях из анализа образцов керна, не всегда имеют достаточную для модели точность. Поэтому корректное использование теплофизических моделей породного массива для прогнозирования его искусственного замораживания возможно только при условии проведения дополнительной процедуры калибровки параметров моделей по дополнительным данным (температурам в КТ скважинах). Калибровка теплофизических параметров в модели породного массива представляет собой решение коэффициентной обратной задачи. Для формулировки обратной задачи необходимо переопределить прямую задачу, включающую в себя уравнения (2), (4), (5), (8), посредством введения заданных измеренных температур $T_i^{(c)}(t)$ в месте расположения (r_i, φ_i) каждой КТ скважины № i .

$$T(t, r, \varphi) = T_i^{(c)}(t), \quad i = 1, \dots, N_C. \quad (34)$$

Здесь N_C — количество КТ скважин.

В работе предложен и реализован численный алгоритм решения обратной задачи Стефана применительно к проблеме калибровки теплофизических параметров замораживаемого массива. Алгоритм основан на минимизации сглаживающего функционала I рассогласований измеренных и модельных температур в КТ скважинах:

$$I = E(T, T_i^{(c)}) + \alpha \Omega = \sqrt{\frac{1}{N_C} \frac{1}{\Delta T^2} \sum_{i=1}^{N_C} (T_i - T_i^{(c)})^2} + \alpha \Omega, \quad (35)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{N_P} \sum_{j=1}^{N_P} \left(\frac{p_j - p_j^*}{p_j^*} \right)^2}, \quad (36)$$

где $E(T, T_i^{(c)})$ — функционал рассогласований температуры, α — скалярный параметр, p_j — калибруемое теплофизическое свойство массива № j ; p_j^* — фиксированные значения теплофизического свойства массива № j ; ΔT — характерная разница температур в задаче, °С. В качестве ΔT может быть взята разница начальной температуры массива и температуры хладоносителя в замораживающих колонках.

Исследованы свойства сглаживающего функционала в фазовом пространстве калибруемых параметров задачи. Показано, что при определенном выборе калибруемых параметров задачи минимум функционала рассогласования перемещается с течением

времени или является неединственным (см. рисунок 12а). Это приводит к неоднозначности процедуры калибровки параметров модели тепловых процессов в замораживаемом породном массиве по данным скважинной термометрии. Физически это связано с возможным перераспределением влажности пород при их замораживании, с особенностями взаимосвязи теплофизических параметров в модели при поддержании толщины ЛПО на стадии пассивного замораживания и с погрешностью измерений отклонений скважин от вертикали. Для решения этой проблемы необходимо вводить регуляризирующий функционал (см. рисунок 12б). При введении функционала требуется особенно тщательно подходить к вопросу выбора его параметров, поскольку получаемое решение может быть чувствительно к ним.

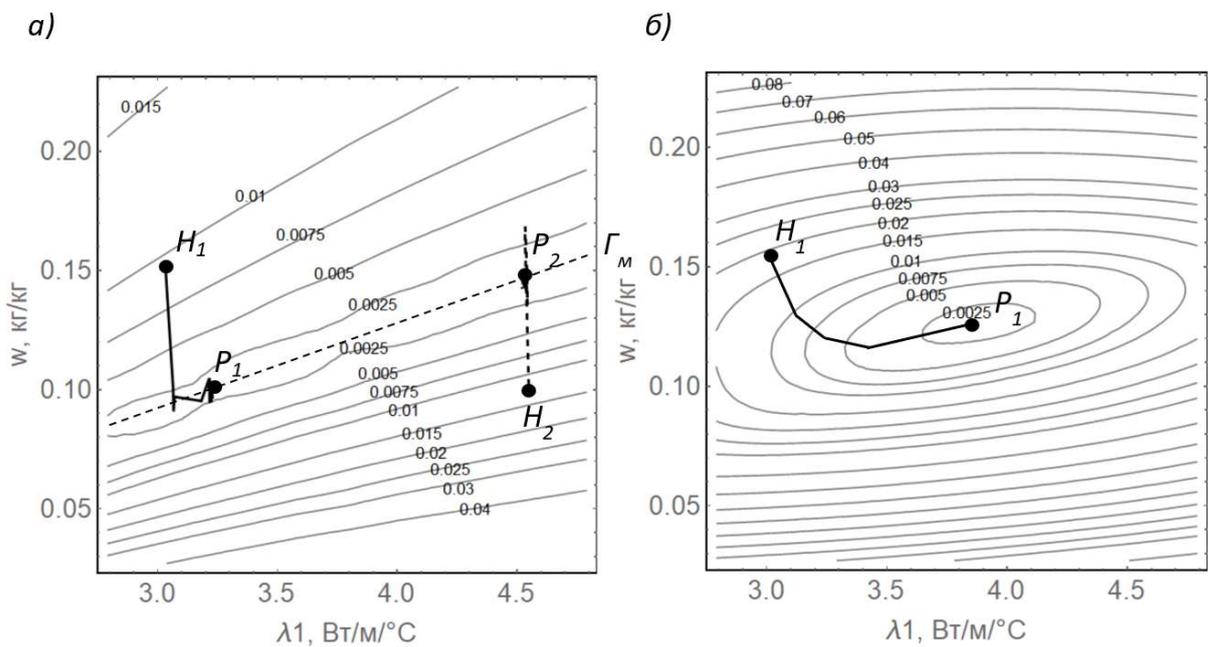


Рисунок 12 — Кривые поиска минимума функционала в фазовом пространстве калибруемых параметров: теплопроводности в зоне льда и влагосодержания породного массива: $\alpha = 0$ (а) и $\alpha = 0,1$ (б)

Определены оптимальные места размещения КТ скважин по критерию скорости и однозначности решения обратной задачи Стефана. Для этого проведено теоретическое исследование чувствительности решения прямой задачи Стефана к вариации теплофизических свойств породного массива. В качестве меры чувствительности принимался следующий скалярный критерий:

$$\Phi(x, y, t) = -\ln \left[\frac{1}{(t-t_0)} \int_{t_0}^t \left(\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial p_i} \right)^2 d\tau \right], \quad i=1,2,3, \quad (37)$$

где τ — время, используемое как внутренняя переменная интегрирования, с.

На рисунке 13 представлены распределения критерия Φ в расчетной области для теплопроводности в зоне льда для различных времен моделирования. Графический анализ критерия Φ позволил определить зоны наибольшей чувствительности решения, в которых и следует размещать КТ скважины. Для наилучшей калибровки теплопроводности породного массива в зоне охлаждения КТ скважину следует размещать вовне контура замораживания на расстоянии 2–2,5 м от него. Это обеспечит наиболее точное решение обратной задачи Стефана на момент достижения ЛПО проектной толщины. Для наилучшей калибровки теплопроводности породного массива в зоне льда, а также влажности породного массива КТ скважину следует размещать в замковой плоскости ЛПО на минимальном расстоянии от контура замораживания.

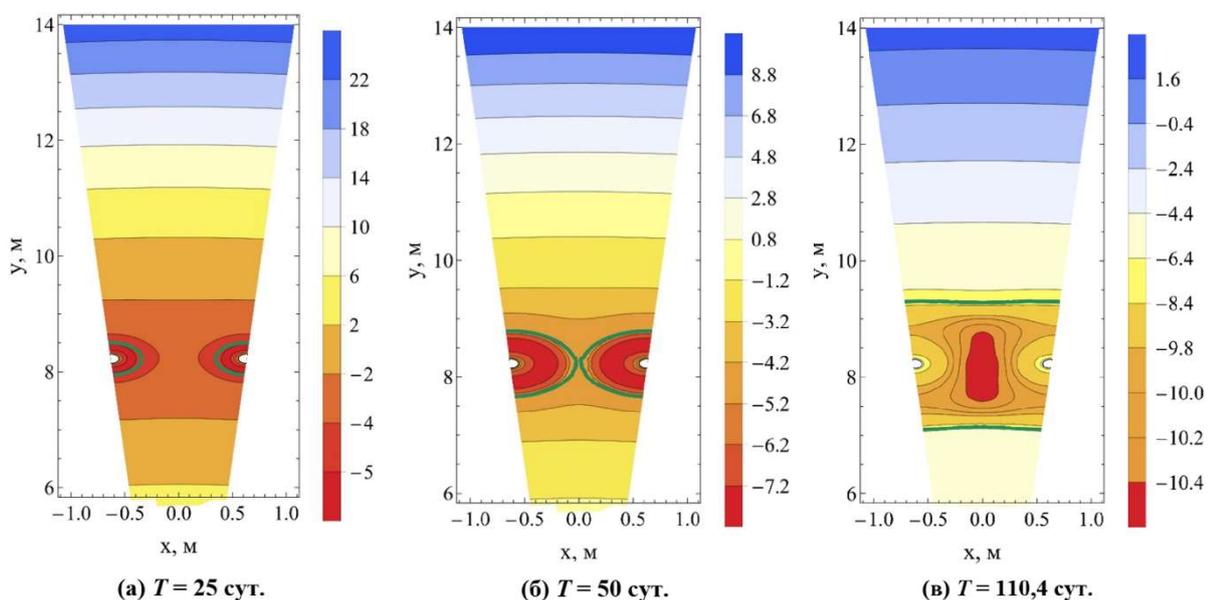


Рисунок 13 — Распределение критерия Φ для теплопроводности в зоне льда песчаник для различных времен моделирования; зеленая линия обозначает фронт фазового перехода

При калибровке множества теплофизических параметров массива выбор положений КТ скважин должен производиться исходя из комплексного рассмотрения калибруемых теплофизических свойств породного массива. Полученное таким образом оптимальное расположение КТ скважины может существенно не совпасть с ее расположениями при рассмотрении параметров калибровки по-отдельности. Неоптимальный выбор мест расположения КТ скважин может привести к существованию множества решений обратной задачи Стефана.

Сделан вывод о том, что при проходке стволов КТ скважины необходимо размещать в количестве, равном 4 шт., на различных удалениях от контура замораживания:

1. В замковой плоскости ЛПО на минимально допустимом расстоянии от контура замораживания (для контроля момента смыкания ЛПО и калибровки теплопроводности породного массива в зоне льда).
2. На линии, соответствующей внешней границе ЛПО согласно проекту замораживания для наиболее теплопроводного слоя пород (для калибровки теплопроводностей наиболее перемороженных слоев породного массива).
3. На линии, соответствующей внешней проектной границе ЛПО, для наименее теплопроводного слоя пород (для калибровки обеих теплопроводностей наименее перемороженных слоев породного массива).
4. На расстоянии, превышающем внешние проектные границы ЛПО для всех замораживаемых слоев пород (для калибровки теплопроводности в зоне охлаждения, для калибровки теплопроводностей при пассивном замораживании).

Сделанные выводы были подтверждены в ходе проведения экспериментального мониторинга температуры при формировании ЛПО на ряде строившихся калийных рудников. В качестве примера в **главе 7** представлены результаты исследований на руднике Нежинского ГОКа. В ходе работы выполнен анализ геологических, гидрогеологических условий на участке проходки стволов, физико-механических и теплофизических свойств горных пород и параметров заморозки. Проведен анализ данных термометрии скважин и проведена калибровка теплофизических свойств слоев пород в термогидравлической субмодели по измеренным температурам в скважинах. Получено, что откалиброванные теплопроводности отличаются от начальных не более, чем на 20 %, а влажность массива отличается не более, чем на 33 %. Откалиброванные теплопроводности в основном, выше начальных, взятых из инженерно-геологических изысканий, в то время как откалиброванные влажности в основном ниже начальных (см. рисунок 14). На стадии пассивного замораживания пород проведены мониторинг и анализ температур воздуха в шахтном стволе и крепи ствола, что позволило дополнительно уточнить модельные параметры. Откалиброванная математическая модель породного массива и реализующий ее численный алгоритм реализованы программно в среде Visual Studio в качестве расчетного модуля программы «Frozen Wall», разрабатываемой Горным институтом УрО РАН при участии автора. Программа «Frozen Wall» является одним из основных компонентов системы мониторинга и контроля процессов формирования и состояния ЛПО шахтных стволов рудника Нежинского ГОКа.

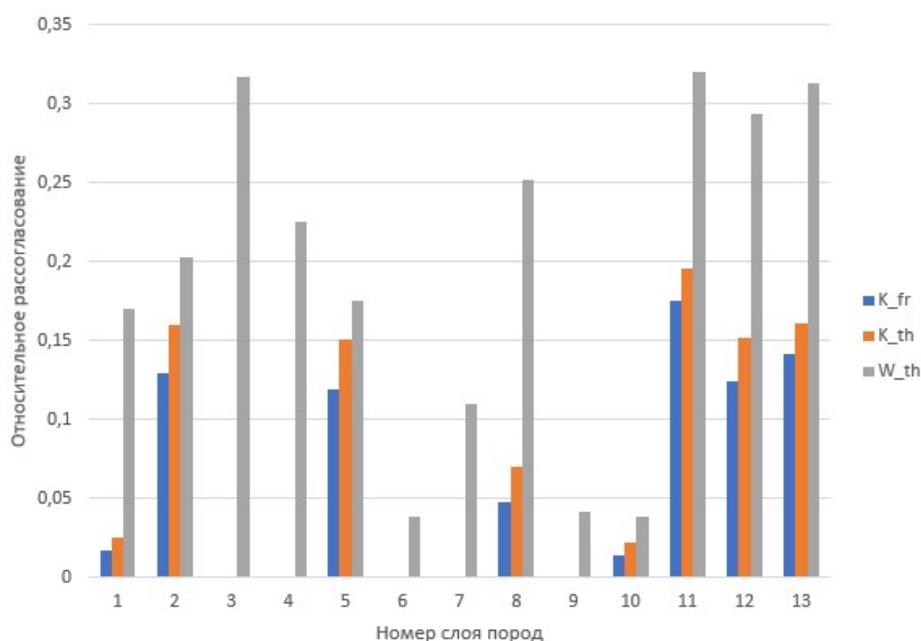


Рисунок 14 — Относительные рассогласования теплофизических свойств слоев горных пород для условий промплощадки рудника Нежинского ГОКа: K_{fr} – теплопроводность замороженных пород, K_{th} – теплопроводность охлажденных пород, W_{th} – влажность пород

Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, также успешно применены при мониторинге состояния ЛПО строящихся стволов ряда других калийных рудников: Петриковского ГОКа, Талицкого ГОКа, Гремячинского ГОКа, Дарасинского рудника.

Проведенные и описанные в **главе 7** исследования легли в основу **VI научного положения**, выносимого на защиту:

Безопасность работ при строительстве горных выработок способом искусственного замораживания достигается за счет развертывания комплексной системы мониторинга теплового режима породного массива, крепи строящейся горной выработки и аэрологических параметров атмосферы горной выработки, обеспечивающей параметризацию связанной математической модели системы по данным экспериментальных измерений и повышающей достоверность анализа состояния ледопородного ограждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором исследований разработаны научные основы расчета искусственного замораживания породного массива с применением рассольной схемы при строительстве шахтных стволов. Совокупность результатов диссертационной работы можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы по обеспечению безопасных условий ведения горных работ на начальном этапе разработки месторождения твердых полезных ископаемых, что имеет важное хозяйственное значение для экономики страны.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Разработаны и развиты методы математического моделирования термогидромеханических процессов в замораживаемом породном массиве и аэрологических процессов в строящейся горной выработке; определены условия, при которых допустимо использование упрощенных математических моделей для анализа отдельных физических процессов в замораживаемом массиве.
2. Проведен анализ теплофизических процессов в породном массиве при искусственном замораживании; определены основные проектные параметры систем замораживания породного массива: количество и глубина замораживающих колонок, время активного замораживания и выбор граничных изотерм для расчета фактической толщины ледопородного ограждения, энергоэффективные стратегии повышения температуры хладоносителя в колонках при переходе на пассивное замораживание.
3. Определены условия, при которых возможно формирование ледопородного ограждения проектных параметров в породном массиве с выраженной фильтрацией подземных вод; определен запас, который необходимо накладывать на проектное значение толщины ледопородного ограждения при различных скоростях фильтрации подземных вод.
4. Проведено исследование вентиляционных процессов в строящейся горной выработке в условиях отрицательных температур крепи и окружающего замороженного породного массива; определены условия появления неблагоприятных частично-возвратных течений воздуха в шахтном стволе при наличии градиента температуры; определены характеристики теплообмена шахтного воздуха с крепью ствола с учетом тепловой конвекции воздуха в стволе.

5. Исследовано напряженно-деформированное состояние ледопородных ограждений шахтных стволов; в результате многопараметрического численного моделирования получены формулы для расчета толщины ледопородного ограждения по условиям прочности и ползучести пород при задании различных внешних нагрузок.
6. Разработаны научно-обоснованные математические методы интерпретации данных скважинной термометрии; обоснованы технологические параметры систем мониторинга искусственного замораживания пород: места расположения и количество контрольно-термических скважин, погрешности измерения температуры по фактору тепловой конвекции рассола.
7. На основании результатов исследований разработан проект по замораживанию породного массива для строящихся стволов Дарасинского рудника в республике Беларусь, разработаны и внедрены системы непрерывного мониторинга за состоянием ледопородного ограждения при строительстве стволов рудников Петриковского ГОКа, Нежинского ГОКа и Талицкого ГОКа; исследованы закономерности замораживания пород в условиях рудника Гремячинского ГОКа.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ,
опубликованных автором по теме диссертации**

**публикации в изданиях, утвержденные Высшей аттестационной комиссией
при Министерстве образования и науки Российской Федерации**

1. Семин М.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С. Выбор параметров и обоснование режима работы замораживающих колонок для поддержания толщины ледопородного ограждения // ФТПРПИ. – 2020. – № 5. – С. 194-205.
2. Семин М.А. Левин Л.Ю., Желнин М.С., Плехов О.А. Исследование естественной конвекции в обводненном породном массиве в условиях искусственного замораживания // ФТПРПИ. – 2020. – № 2. – С. 151-163.
3. Семин М.А. Левин Л.Ю., Пугин А.В. Расчет земных теплопритоков при искусственном замораживании породного массива // ФТПРПИ. – 2020. – № 1. – С. 162-171.
4. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // ФТПРПИ. – 2019. – №. 1. – С. 172-184.

5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов // ФТПРПИ. – 2017. – №. 5. – С. 154-161.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // ФТПРПИ. – 2014. – №. 2. – С. 154-161.
7. Семин М.А. Богомягков А.В., Левин Л.Ю. Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания // Записки горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 319-328.
8. Левин Л. Ю., Семин М. А., Паршаков О. С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 268-274.
9. Семин М.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С. Исследование влияния фильтрационного потока грунтовых вод на искусственное замораживание породного массива // ИФЖ – 2021. – Т. 94, № 1. – С. 51-61.
10. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве // ИФЖ. – 2018. – Т. 91, №. 3. – С. 655-663.
11. Семин М.А., Зайцев А.В., Паршаков О.С., Желнин М.С. Обоснование технологических параметров термометрического контроля состояния ледопородного ограждения // Изв. ТПУ. Инж. Георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 9. – С. 215-228.
12. Семин М.А., Левин Л.Ю., Богомягков А.В., Пугин А.В. О неоднозначности интерпретации поля температур замораживаемого породного массива с помощью скважинной термометрии // Изв. ТПУ. Инж. георес. – 2021. – Т. 332, № 6. – С. 7-18.
13. Желнин М. С., Плехов О.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива в процессе искусственного замораживания // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2017. – №. 4. – С. 56-75.
14. Левин Л. Ю., Семин М. А., Плехов О. А. Сравнительный анализ существующих методов расчета толщины ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, №. 4. – С. 93-103.
15. Левин Л. Ю., Семин М.А., Паршаков О.С., Колесов Е.В. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке

- шахтных стволов // Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 255-267.
16. Левин Л. Ю., Семин М. А., Богомялков А. В., Паршаков О. С. Применение программного комплекса «FROZENWALL» для расчета искусственного замораживания пород // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 269-283.
 17. Семин М.А. Исследование возможностей упрощения сопряженной термогидромеханической модели искусственного замораживания пород при строительстве стволов шахт // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 453-463.
 18. Бублик С.А., Зайцев А.В., Шардаков И.Н., Семин М.А. Исследование деформационных процессов в металлоконструкциях надшахтного здания скипового ствол // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 258-267.
 19. Семин М.А., Бровка Г.П., Пугин А.В., Бублик С.А., Желнин М.С. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // ГИАБ. – 2021. – № 9. – С. 79-93.
 20. Паршаков О.С., Левин Л.Ю., Семин М.А. Анализ процесса оттаивания горных пород при проходке шахтных стволов способом искусственного замораживания // ГИАБ. – 2021. – № 8. – С. 51-69.
 21. Семин М.А., Левин Л.Ю. Теоретическое исследование теплообмена между воздушным потоком и крепью шахтного ствола при наличии тепловой конвекции // ГИАБ. – 2020. – № 6. – С. 46-57.
 22. Колесов Е.В., Семин М.А. Скоростной метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // ГИАБ. – 2017. – № S24. – С. 299-309.
 23. Левин Л. Ю., Колесов Е. В., Семин М. А. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения замораживающих колонок при проходке шахтных стволов // ГИАБ. – 2016. – № 11. – С. 257-265.
 24. Семин М.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю. Численное решение обратной задачи Стефана при анализе искусственного замораживания породного массива // Мат. мод. – 2021. – Т.33, № 2. – С. 93-108.
 25. Семин М.А., Левин Л.Ю., Желнин М.С., Плехов О.А. Определение мест расположения контрольно-термических скважин при искусственном замораживании породного массива // ПММ. – 2021. – Т. 85, № 2. – С. 257-272.
 26. Желнин М.С., Костина А.А., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Агутин К.А., Семин М.А. Верификация термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного

- грунта на основе лабораторных экспериментов // Выч. мех. сплош. сред. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 144-158.
27. Семин М.А., Богомятков А.В., Левин Л.Ю. Определение технологических параметров систем замораживания пород из условия поддержания проектной толщины ледопородного ограждения // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 192-202.
28. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // Tunn. Undergr. Space Technol. – 2021. – Т. 107. – статья № 103685.
29. Zhelnin M., Kostina A., Prokhorov A., Plekhov O., Semin M., Levin L. Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of frost heave and water migration during artificial freezing of soils for mineshaft sinking // J. Rock Mech. Geotech. Eng. – 2021. [In Press]
30. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Semin M. A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage // Int. J. Heat Mass Transf. – 2015. – Т. 86. – С. 288-293.
31. Semin M., Levin L. Theoretical study of partially return air flows in vertical mine shafts // Therm. Sci. Eng. Prog. – 2021. – Т. 23. – статья № 100884.
32. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of Temperature Anomalies during Thermal Monitoring of Frozen Wall Formation // Fluids. – 2021. – Т. 6. – статья № 297.
33. Semin M., Levin L., Bogomyagkov A., Pugin A. Features of Adjusting the Frozen Soil Properties Using Borehole Temperature Measurements // Model. Simul. Eng. – 2021. – Т. 2021. – статья № 8806159.

публикации в других изданиях, индексируемых в международных базах

34. Semin M., Levin L. Numerical simulation of frozen wall formation in water-saturated rock mass by solving the Darcy-Stefan problem // Frat. ed Integrita Strutt. – 2019. – Т. 13, №. 49. – С. 167-176.
35. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Panteleev I., Levin L., Semin M. An Applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation // Frat. ed Integrita Strutt. – 2020. – Т. 14, №. 53. – С. 394-405.
36. Semin M., Levin L. Free convection of pore water in saturated permeable rock mass during artificial freezing // Int. Multidiscip. Sci. GeoConference Surv. Geol. Min. Ecol. Manag. SGEM. – 2020. – Т. 20, №. 1.1. – С. 507-518.
37. Semin M.A. Calculation of frozen wall thickness considering the non-uniform distribution of the strength properties // Procedia Struct. Integr. – 2021. – Т. 32. – С. 180-186.

монографии

38. Семин М.А., Левин Л.Ю. Методы расчета искусственного замораживания пород при строительстве шахтных стволов. – М.: Научный мир, 2021. – 152 с.

патенты, свидетельства об официальной регистрации, нормативные документы

39. Патент № 038447 (ЕАПО). Скважинный оптоволоконный датчик непрерывного контроля температуры / Головатый И.И., Барбиков Д.В., Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А., Дьяконов А.С.; заявитель и патентообладатель: ОАО «Беларуськалий», ПФИЦ УрО РАН. — № 2019000097; заявл. 06.09.2019; опубл. 30.08.2021, Бюллетень № 8. — 4 с.
40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2018666337. «FrozenWall». / Богомяков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А. // заявитель и правообладатель: ПФИЦ УрО РАН. – № 2018663501 заявл. 28.11.2018. опубл. 17.12.2018. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2021610234 «S-Freeze». / Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А. // заявитель и правообладатель: ПФИЦ УрО РАН. – № 2020666695 заявл. 14.12.2020. опубл. 12.01.2021. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
42. Инструкция по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий». – Пермь-Солигорск, 2019. – 65 с.

Сдано в печать ____ 2022 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а