

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Паршаков Олег Сергеевич

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ**

Специальность 25.00.20

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Левин Лев Юрьевич

Пермь 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1. Обзор аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов специальным способом искусственного замораживания горных пород.....	11
1.2. Анализ существующих способов контроля формирования и состояния ледопородного ограждения.....	14
1.3. Анализ методов расчета параметров ледопородного ограждения в замораживаемом обводненном породном массиве	21
1.4. Цель и задачи исследования	27
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД.....	28
2.1. Разработка метода решения обратной задачи Стефана	28
2.1.1. Математическая постановка прямой задачи Стефана.....	29
2.1.2. Математическая постановка обратной задачи Стефана.....	35
2.1.3. Исследование функционала рассогласований температур	38
2.1.4. Метод решения обратной задачи Стефана	41
2.2. Корректировка параметров математической модели.....	42
2.3. Исследование влияния технологических факторов на состояние ледопородного ограждения при проходке шахтного ствола.....	44
2.4. Выводы	50
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ СТРОЯЩИХСЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ	52
3.1. Экспериментальные измерения распределения температуры горных пород в контрольно-термических скважинах	52
3.2. Верификация показаний оптоволоконной системы термометрического мониторинга	56
3.3. Интеграция метода решения обратной задачи Стефана с экспериментальными измерениями температуры горных пород	59
3.4. Концепция автоматизированной системы контроля формирования и состояния ледопородного ограждения на основе оптоволоконной технологии	60
3.5. Верификация математической модели на основе данных инструментальных измерений	64
3.6. Выполнение контроля формирования и состояния ледопородного ограждения	67
3.7. Выводы	75
4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	76
4.1. Экспериментальные исследования теплового поля породного массива в условиях его искусственного замораживания	77

4.2. Исследование влияния расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана.....	84
4.3. Анализ требуемого количества контрольно-термических скважин для выполнения всестороннего контроля параметров ледопородного ограждения.....	95
4.4. Обоснование пространственного разрешения измерений распределенной температуры горных пород.....	99
4.5. Методика определения оптимальных технологических параметров способа термометрического контроля	102
4.6. Выводы	106
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО И ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ.....	108
5.1. Требования к параметрам системы термометрического контроля.....	108
5.2. Методика построения математической модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве	110
5.2.1. Исходные данные для математического моделирования.....	110
5.2.2. Требования к математической модели и численным методам расчета	112
5.3. Разработка программного обеспечения для прогноза параметров состояния ледопородного ограждения.....	114
5.3.1. Исходные данные	115
5.3.2. Расчет	116
5.3.3. Вывод результатов	119
5.4. Повышение качества контроля состояния ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов рудников Талицкого ГОК	121
5.5. Выводы	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

Промышленное освоение месторождений, залегающих в сложных геологических и гидрогеологических условиях, тесно связано с универсальным и надежным способом искусственного замораживания горных пород при строительстве вертикальных шахтных стволов. В процессе замораживания вокруг проектного сечения ствола формируется временное защитное ограждение из мерзлой водонасыщенной породы, служащее для восприятия горного и гидростатического давлений. Эффективность функционирования созданного ледопородного ограждения, под защитой которого в дальнейшем ведутся горнопроходческие работы, зависит от параметров его состояния — герметичности (сплошности) и толщины.

Действующие на территории России и Беларуси правила безопасности предъявляют ряд требований к проведению подземных выработок способом искусственного замораживания. В частности, за состоянием замороженного породного массива должен быть организован систематический контроль, при этом ведение горных работ в условиях искусственного замораживания горных пород разрешается только после образования замкнутого ледопородного ограждения проектной толщины.

На сегодняшний день применяется несколько способов контроля параметров состояния ледопородного ограждения, основанных на прямых и косвенных методах получения информации о протекании физических процессов в замораживаемом массиве пород. Исследованием процессов формирования ледопородного ограждения и разработкой методов его контроля занимались Трупак Н.Г., Бельферман М.У., Вялов С.С., Хакимов Х.Р., Дорман Я.А., Федюкин В.А., Долгов О.А., Тютюнник П.М., Роменский А.А., Маньковский Г.И., Ольховиков Ю.П., Баклашев И.В., Наносов И.Д., Картозия Б.А., Шуплик М.Н., Либерман Ю.М., Andersland O.B., Poetsch F.H., Patrick Powers J., Harris J.S., Sasmito A.P., Tijani M., Newman G.P. и другие. В существующей литературе расчеты параметров ледопородного ограждения выполняются только на основе решения прямых задач теплопроводности с учетом фазового перехода. Однако применяемые для расчета теплофизические свойства пород, получаемые на основании инженерно-геологических изысканий, зачастую имеют высокую погрешность. В результате математические модели, описывающие тепло- и массообменные процессы в обводненном породном массиве, оказываются неэффективными при прогнозировании параметров состояния ледопородного ограждения. Дополнительно погрешность результатов расчета обусловлена

неоднородностью и анизотропностью реального породного массива, а также наличием технологических факторов, оказывающих влияние на процесс искусственного замораживания.

За последние годы, ввиду несовершенства существующих способов контроля ледопородного ограждения и недостаточной точности расчетов его параметров, при строительстве шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях на таких горных предприятиях, как Гремячинский ГОК — ОАО МХК «ЕвроХим», Гарлыкский ГОК — ГК «Туркменхимия», рудоуправления Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей имели место аварийные ситуации. Это приводило к затоплению шахтных стволов, снижению безопасности ведения горных работ, увеличению сроков строительства и появлению дополнительных финансовых затрат.

Для предотвращения аварийных ситуаций в период всего срока строительства шахтных стволов в интервале обводненного породного массива целесообразно разработать новый способ контроля ледопородных ограждений, основанный на применении оптоволоконной технологии и математической интерпретации результатов термометрии контрольных скважин. Способ контроля, разработанный с учетом существенного развития вычислительной техники и средств измерения температуры горных пород в агрессивных условиях окружающей среды, позволит по ограниченной информации о температуре горных пород в отдельных скважинах определять температурное поле во всем объеме замораживаемого участка породного массива.

Вышеперечисленные обстоятельства указывают на актуальность разработки совокупности математических методов, программных средств и технологических параметров построения системы термометрического контроля формирования и состояния ледопородного ограждения, позволяющих обеспечить эффективность строительства шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях, а также повысить безопасность ведения горных работ.

Цель работы

Разработка способа контроля состояния замораживаемого участка породного массива на основе данных термометрии скважин при строительстве шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

Основная идея работы

Интеграция экспериментальных измерений температуры горных пород и метода решения обратной задачи Стефана для повышения точности прогнозирования параметров состояния ледопородного ограждения.

Основные задачи работы

1. Разработать метод решения обратной задачи Стефана в замораживаемом породном массиве на основе экспериментальных данных о температуре горных пород в контрольно-термических скважинах шахтного ствола.
2. Провести экспериментальные измерения распределения температуры горных пород по всей глубине контрольно-термических скважин.
3. Выполнить численное моделирование теплораспределения в обводненном породном массиве с учетом предварительной калибровки его теплофизических свойств и верифицировать полученные модельные результаты с экспериментальными данными.
4. Разработать систему термометрического контроля состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов, которая позволит определять температуру во всем замораживаемом породном массиве на основе информации о температуре горных пород в ограниченном количестве контрольно-термических скважин.
5. Исследовать и обосновать технологические параметры способа термометрического контроля формирования и состояния ледопородного ограждения.
6. Разработать технологическое и методическое обеспечение построения системы непрерывного и оперативного контроля состояния ледопородного ограждения.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта, экспериментальные исследования временной и пространственной динамики температуры горных пород по глубине контрольно-термических скважин и процессов формирования теплового поля замораживаемого породного массива вокруг участков строящихся шахтных стволов, статистическую обработку результатов экспериментов, математическое моделирование термодинамических процессов, происходящих в условиях искусственного замораживания обводненных горных пород, анализ результатов численных экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту

- Алгоритм калибровки теплофизических свойств обводненных горных пород, основанный на численном решении обратной задачи Стефана с выделенным комплексом независимых параметров задачи, позволяющий разрабатывать адекватные математические модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве.
- Система контроля формирования и состояния ледопородных ограждений, основанная на интеграции математической модели термодинамических процессов, происходящих в породном массиве с учетом влияния технологических факторов, и экспериментальных измерений полей температуры горных пород и параметров заморозки, позволяющая определять состояние ледопородного ограждения на всех этапах строительства шахтных стволов.
- Определение технологических параметров способа термометрического контроля на основе экспериментальных исследований и решения задачи оптимизации размещения контрольно-термических скважин с учетом обоснованного пространственного разрешения измерений температуры горных пород позволяет обеспечить точность прогнозирования теплораспределения в условиях искусственного замораживания породного массива.

Научная новизна

1. Произведен выбор параметров калибровки математической модели из множества теплофизических свойств горных пород, от которых зависит распределение температуры в породном массиве и концентрации объемной доли льда в порах.
2. Разработан способ контроля термодинамических процессов, происходящих в обводненном породном массиве в условиях его искусственного замораживания,

основанный на решении обратной задачи Стефана для горизонтального слоя влагонасыщенных горных пород.

3. Исследовано влияние выхода из строя замораживающих колонок на распределение температуры в слое замораживаемой горной породы.
4. Выполнено обоснование технологических параметров способа термометрического контроля замораживаемого породного массива, влияющих на точность расчета его температурного поля и обеспечивающих получение достоверной информации о параметрах ледопородного ограждения строящегося шахтного ствола в сложных гидрогеологических условиях.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов численных решений и натурных измерений, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами, значительным объемом экспериментальных исследований процессов формирования и состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов, положительными результатами верификации разработанных математических моделей.

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют осуществлять проектирование автоматизированных систем термометрического контроля формирования и состояния ледопородных ограждений, а также производить непрерывный и оперативный контроль их параметров, обеспечивающих безопасность ведения горных работ при строительстве шахтных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях.

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

Система термометрического контроля ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов реализована на рудниках Петриковского ГОК ОАО «Беларуськалий», Нежинского ГОК ИООО «Славкалий» и Талицкого ГОК ЗАО «ВКК». При помощи системы контроля для горных предприятий ежедневно формировались отчеты о состоянии ледопородного ограждения, на основании которых принимались решения о возможности начала проходки шахтных стволов, осуществлялась выдача заключений о достижении ледопородным ограждением сплошности и минимально требуемой

толщины, предоставлялись рекомендации по корректировке параметров работы замораживающих станций, а также выполнялся прогноз с учетом различных технологических факторов, влияющих на состояние ледопородного ограждения.

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 планами научных исследований «ГИ УрО РАН», проводившихся в период с 2018 г. по 2019 г. по теме «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», а также с тематикой хоздоговорных работ с предприятиями ОАО «Беларуськалий», ЗАО «ВКК» и ИООО «Славкалий».

С 2017 г. по 2019 г. исследования по теме диссертации поддержаны Российским научным фондом (проект № 17-11-01204 «Структурно-энергетические модели деформирования и разрушения природных и искусственных материалов в условиях Арктических температур»).

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на III Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, СПбГУ, 2016 г.), на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, «ГИ УрО РАН», 2017 — 2019 гг.), на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МИСиС, 2017 — 2018 гг.), на XI Международном симпозиуме по проблемам инженерного мерзлотоведения (Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2017 г.), на II Всероссийской конференции «Оптическая рефлектометрия-2018» (Пермь, Лаборатория фотоники ПФИЦ УрО РАН, 2018 г.), на «Зимней школе по механике сплошных сред» (Пермь, «ИМСС УрО РАН», 2017 г., 2019 г.).

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора проведены: постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования процессов формирования и

состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и численных экспериментов, разработка научных решений и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Практические эксперименты и внедрения результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов ОАО «Беларуськалий», ИООО «Славкалий» и ЗАО «ВКК»: Головатого И.И., Тараканова С.А., Макарова А.Н. и других.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук Левину Л.Ю. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, канд. техн. наук Зайцеву А.В. за помощь в выполнении работы, канд. техн. наук Семину М.А. за помощь в разработке и программной реализации алгоритмов. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая, доброжелательная атмосфера в коллективе, поддержка и понимание членов семьи.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликованы 10 печатных работ, в том числе 5 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, из них 3 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, получено свидетельство о государственной регистрации программы «FrozenWall» для ЭВМ № 2018666337.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка и 6 таблиц. Список использованных источников состоит из 180 наименований, в том числе 72 зарубежных.

1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Обзор аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов специальным способом искусственного замораживания горных пород

Строительство шахтных стволов способом искусственного замораживания горных пород в сложных гидрогеологических и геологических условиях нередко сопровождается осложнениями и серьезными авариями, последствия которых могут привести к затоплению горной выработки, а следовательно и к реальной угрозе ее полной потери. За длительный период применения искусственного замораживания (начиная с 1883 г.) в существующей литературе [59, 66, 69, 70, 79, 91, 92, 93, 94, 131, 133] приводится множество примеров возникновения аварийных ситуаций при освоении месторождений полезных ископаемых.

Появление различных осложнений в процессе искусственного замораживания горных пород вызвано неполнотой достоверных данных о физических свойствах замораживаемых горных пород и проходимых водоносных горизонтов, некорректными расчетами проектных параметров замораживания, наличием локальных неоднородностей в породном массиве, выходом из строя замораживающих колонок, влиянием технологических факторов в процессе проходки шахтного ствола, некачественным сооружением крепи горной выработки и ее гидроизоляции.

Систематизация причин возникновения аварийных ситуаций на всех этапах строительства ствола с использованием способа искусственного замораживания горных пород приведена в работах [39, 47]. Отмечено, что в период замораживания горных пород наиболее часто имеет место такой вид аварий как разрыв замораживающих колонок, при этом причины этого явления полностью не выявлены. В период оттаивания ледопородного ограждения возникают температурные напряжения, которые приводят к возможности образования трещин и разрушению материала в многослойной крепи выработки. В работе [87] рассмотрены случаи аварий, которые связаны с недооценкой весьма сложных гидрогеологических и геологических условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Детальное исследование количества и анализ видов аварий при проходке шахтных стволов за период с 1948 г. по 2014 г. с применением замораживания участков породных массивов показывает, что 44 % (106 случаев) аварий связаны с неравномерностью процесса замораживания и оттаивания горных пород, 26 % (63 случая) — разрушение замораживающих колонок, 14 % (31 случай) — внезапный

прорыв воды или рассолов, 6 % (15 случаев) — деформация поверхности и поднятия копров [70, 71].

Как правило, последствия представленных выше видов аварийных ситуаций приводят к переносу сроков ввода в эксплуатацию рудника, увеличению затрат на энергопотребление холодильного оборудования, а также к снижению безопасности ведения горных работ в интервале искусственного замораживания горных пород [34, 52, 69, 74, 91].

Необходимо отметить, что многочисленные аварии, возникающие при проходке шахтных стволов, не публикуются в открытой печати до завершения их строительства и выхода на проектную мощность рудника. При этом, как показывает практика, для ввода в действие горного предприятия с момента разработки проекта организации строительства требуется не менее 4-6 лет. В связи с чем выполнить полноценный анализ количества и видов аварийных ситуаций, которые произошли в период с 2014 г. по 2019 г. при строительстве шахтных стволов в условиях искусственного замораживания горных пород, не представляется возможным. Обзор наиболее серьезных аварийных ситуаций, которые произошли за данный период, представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Аварийные ситуации за период с 2014 г. по 2019 г.

Месторождение, ГОК	Условия замораживания горных пород	Причина и последствие аварийной ситуации/осложнений
Гремячинское, Гремячинский	<p>Замораживание пород вокруг ствола № 3 диаметром в свету 7 м.</p> <p>Глубина замораживания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основной контур замораживающих колонок 520 м и 816 м; - дополнительный контур до 832 м. <p>Рабочая температура хладоносителя -35 °С.</p> <p>Способ проходки ствола буровзрывной.</p>	<p>Неуправляемый водоприток возник на глубине проходки ствола 810 м. Возникновение прорыва воды в ствол связано со значительным отклонением на данной глубине замораживающих скважин от вертикали и неправильным выбором глубины замораживания на этапе проектирования. Это привело к образованию гидравлического «окна» в ледопородном ограждении и последующему затоплению ствола.</p>

Месторождение, ГОК	Условия замораживания горных пород	Причина и последствие аварийной ситуации/осложнений
Гарлыкское (Карлюкское), Гарлыкский	<p>Замораживание пород вокруг ствола № 2 диаметром в свету 6,5 м.</p> <p>Глубина замораживания 120 м.</p> <p>Рабочая температура хладоносителя -38 °С.</p> <p>Способ проходки ствола буровзрывной.</p>	<p>Прорыв воды в ствол ввиду некорректно рассчитанных и принятых в дальнейшем проектных параметров замораживания горных пород (неверно определена глубина бурения замораживающих скважин). Как следствие — перенос сроков ввода рудника в эксплуатацию.</p>
Верхнекамское, Усольский	<p>Замораживание пород вокруг ствола № 1 диаметром в свету 8 м.</p> <p>Глубина замораживания 275 м.</p> <p>Рабочая температура хладоносителя -38 °С.</p> <p>Способ проходки ствола буровзрывной.</p>	<p>При выполнении гидроизоляции ствола (в процессе размораживания ледопородного ограждения) установлены значительные водопритоки через крепь выработки.</p> <p>Причиной осложнений являлось интенсивное оттаивание горных пород (при температуре прямого потока теплоносителя до +30 °С), что повлекло за собой раннюю потерю ледопородного ограждения и привело к температурным деформациям в крепи.</p>
Верхнекамское, Талицкий	<p>Замораживание пород вокруг стволов № 1 и № 2 диаметром в свету 8 м.</p> <p>Глубина замораживания 230 м.</p> <p>Рабочая температура хладоносителя -38 °С.</p> <p>Способ проходки ствола механизированный (комбайновый).</p>	<p>В интервале проходки технологических отходов на стенках стволов имелись управляемые водопритоки.</p> <p>Причина осложнений заключалась в высоком термическом сопротивлении замораживающих скважин из-за некачественного выполнения тампонажа их затрубного пространства (наличие воздушной прослойки). Как следствие, устранение пустот в затрубном пространстве привело к дополнительным временным, трудовым и финансовым затратам.</p>

Развитие техники и технологии производства работ по искусственному замораживанию горных пород, создание научной базы, описывающей все аспекты процессов замораживания, разработка инженерных методов расчета параметров состояния ледопородного ограждения и холодильного оборудования ежегодно свидетельствуют о сокращении серьезных аварийных ситуаций, таких как затопление

шахтного ствола при его проходке, и разрушение замораживающих колонок в периоды искусственного замораживания и оттаивания горных пород [17, 70, 84, 91, 101, 106]. Однако, как показывает опыт последних лет, осложнения, возникающие в процессе строительства ствола, происходят и на сегодняшний день.

Следует отметить, что на данный момент тенденция освоения месторождений в сложных гидрогеологических и геологических условиях продолжает возрастать. В ближайшие годы способом искусственного замораживания горных пород предусматривается строительство шахтных стволов Нивенского ГОК (Калининградская область), Дарасинского рудника (Республика Беларусь), участков ВКМКС. Увеличение объема работ по замораживанию горных пород, несмотря на высокий уровень развития технологий, с большой долей вероятности может привести к различным осложнениям и аварийным ситуациям.

1.2. Анализ существующих способов контроля формирования и состояния ледопородного ограждения

Целью искусственного замораживания породного массива является формирование вокруг будущей горной выработки (шахтного ствола) ледопородного ограждения. Ледопородное ограждение служит для восприятия горного и гидростатического давлений, представляя собой дорогое и ответственное инженерное сооружение, эффективность которого зависит от параметров его состояния — герметичности (сплошности) и толщины [31, 38, 42, 59, 61, 65, 66, 92, 100, 133].

Параметры состояния ледопородного ограждения в процессе его образования, поддержания и оттаивания определяются на основе выполнения контроля за участком породного массива в условиях его искусственного замораживания. Неверное установление фактических параметров ледопородного ограждения, обеспечивающих необходимую прочность и устойчивость обводненных горных пород, может привести к необратимой аварийной ситуации при строительстве шахтного ствола.

Основными задачами контроля формирования и состояния ледопородного ограждения являются: в период активного замораживания горных пород принятие решения о начале производства горнопроходческих работ на основании рассчитанных фактических размеров ледопородного ограждения, в пассивный период — обеспечение безопасности ведения горнопроходческих работ с учетом поддержания ледопородного ограждения, в период размораживания — выдача рекомендаций по проведению тампонажных работ в оттаявшем затюбинговом пространстве шахтного ствола для качественного возведения его постоянной крепи. Кроме этого, на основании контроля

осуществляется корректировка параметров работы холодильного оборудования для своевременного достижения и энергоэффективного поддержания требуемых параметров ледопородного ограждения.

Общие методы, приборы и системы геоконтроля изложены в работах [9, 18, 21, 68]. Авторами представлены основы геофизических исследований структуры, свойств и состояния геологической среды в зоне строительства, описаны средства мониторинга соответствующих технологических процессов, а также эксплуатационный контроль подземных сооружений.

Исследованием и разработкой мероприятий контроля процесса искусственного замораживания занимались Трупаков Н.Г., Тютюнник П.М., Картозия Б.А., Шуплик М.Н., Дорман Я.А., Роменский А.А., Насонов И.Д., Федюкин В.А., Бельферман М.У., Хакимов Х.Р. [12, 31, 43, 44, 66, 80, 92, 95, 96, 97, 98, 100, 101]. За рубежом данный вопрос изучали Andersland O.B., Harris J.S., Sasmito A.P., Schmall P., Sopko J., Tijani M. [110, 112, 133, 160, 162, 167, 168, 172].

Способы контроля за замораживаемым участком породного массива по критерию метода получения информации о его состоянии условно можно разделить на две группы — косвенные и прямые. При помощи косвенных способов контроля наблюдают за работой замораживающего комплекса и оценивают состояние ледопородного ограждения на основании упрощенных расчетов с использованием данных различных измерительных приборов, характеризующих процесс искусственного замораживания. Косвенные способы контроля основаны на:

- визуальном осмотре соединительных труб, подключенных к распределительному коллектору, по которому подается хладоноситель, а также отводящих труб и головок замораживающих скважин. Наличие пушистого инея является показателем нормальной работы замораживающих колонок, а желтый, рыхлый, легко отделяющийся при постукивании иней свидетельствует о том, что колонка не работает;
- измерении и сравнении температур прямого и обратного потоков хладоносителя в замораживающих колонках (в первые дни замораживания разность температур составляет 4-5 градусов Цельсия, затем она постепенно снижается и к концу процесса достигает примерно 1 градуса Цельсия);
- определении количества теплоты, отнимаемой хладоносителем у обводненного породного массива посредством замораживающих колонок, которое рассчитывается по формуле:

$$Q = W\gamma c(t_2 - t_1), \quad (1.1)$$

где W — расход хладоносителя в замораживающих колонках, $\text{м}^3/\text{ч}$; γ — плотность хладоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$; c — теплоемкость хладоносителя, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$; t_1 — температура прямого потока хладоносителя, $^\circ\text{C}$; t_2 — температура обратного потока хладоносителя, $^\circ\text{C}$;

- сопоставлении количества отнимаемой теплоты, рассчитанного по выше приведенной формуле (1.1), с количеством холодопроизводительности замораживающей станции за одинаковые промежутки времени с учетом теплопотерь в сети трубопроводов.

Следует отметить, что с помощью косвенных методов наблюдения за процессами, происходящими в породном массиве в условиях его искусственного замораживания, невозможно корректно оценить сплошность и толщину формируемого ледопородного ограждения. Теплораспределение в массиве горных пород подвержено влиянию целого ряда факторов, связанных с изменением характеристик залегания, минералогического и гранулометрического составов, пористости и теплофизических свойств горных пород, а также степени и состава минерализации подземных вод, их количества и температуры замерзания. Поэтому для уточнения физических параметров горных пород в процессе их замораживания необходимо дополнительно производить экспериментальные наблюдения, которые относятся к прямым способам контроля.

Прямые способы контроля состояния ледопородного ограждения являются наиболее распространенными и информативными, однако в ряде случаев они весьма трудоемки и требуют значительных материальных затрат. Эти способы основаны на получении информации о состоянии ледопородного ограждения при помощи пробуренных на участке замораживания породного массива контрольных скважин. К прямым способам контроля относятся акустический/ультразвуковой, гидронаблюдательный и термометрический.

Акустический/ультразвуковой способ контроля состояния ледопородного ограждения основан на законах распространения упругих волн в породном массиве. Изменение агрегатного состояния обводненного породного массива в процессе его замораживания ведет к изменению прочностных и упругих свойств горных пород, которые оказывают влияние на динамические (амплитуда, спектральные характеристики) и кинематические (скорость продольных и поперечных волн) параметры упругих волн. По акустическим свойствам оценивается степень промороженности и наличие гидравлических «окон» в ледопородном ограждении. Основные принципы акустических способов контроля качества и процесса формирования ледопородных ограждений при сооружении подземных объектов

представлены в работах [2, 3]. Гидронаблюдательный способ контроля заключается в периодическом определении положения уровня и температуры подземных вод в гидрогеологических скважинах, расположенных как в пределах замораживаемого контура, так и вне его. Данные гидронаблюдательных скважин являются основным фактором при решении вопроса о переходе с активного режима замораживания горных пород на пассивный. Термометрический способ контроля ледопородного ограждения заключается в осуществлении периодических измерений температуры горных пород на различных участках и глубинах замораживаемого породного массива. По полученным данным определяют границы ледопородного ограждения.

В комплексе, приведенные выше, прямые способы контроля в целом позволяют прогнозировать фактические параметры ледопородного ограждения, однако каждый из этих способов имеет ряд существенных недостатков. В частности, для гидронаблюдательного способа контроля основными недостатками являются невозможность определения толщины ледопородного ограждения и использование гидрогеологической скважины, свидетельствующей об отсутствии гидравлических «окон», только до начала проходки шахтного ствола. Кроме этого, при наличии нескольких водоносных горизонтов в пределах проектного контура проходки необходимо на каждый горизонт бурить гидронаблюдательную скважину, либо оборудовать одну скважину несколькими фильтрами, при этом оценить в каком интервале замораживания горных пород сплошность ледопородного ограждения достигнута, становится крайне сложно. В результате это приводит к увеличению затрат на бурение, либо к повышению трудозатрат на сооружение непростой конструкции гидронаблюдательной скважины.

При выполнении акустического/ультразвукового контроля неизбежно наличие погрешностей измерений упругих волн. Во-первых, это связано с относительной погрешностью измерений применяемой аппаратуры, во-вторых — с наличием различных волн-помех, обусловленных условиями непрерывного ведения строительных работ на промышленной площадке. Также в связи с тем, что акустический/ультразвуковой способ контроля ледопородного ограждения заключается в межскважинном просвечивании (прозвучивании), которое предполагает совместную работу в нескольких скважинах (одна скважина — для пунктов возбуждения, одна — для пунктов приема), циркуляцию хладоносителя в выделенной паре замораживающих скважин на период проведения измерений необходимо останавливать. Исключение из работы замораживающей скважины сопряжено с высокими трудозатратами, при этом следует отметить, что акустический/ультразвуковой контроль ледопородного

ограждения включает в себя три цикла измерений: нулевой, промежуточный и заключительный, поэтому в процесс замораживания горных пород приходится вмешиваться неоднократно. Еще один недостаток акустического/ультразвукового метода контроля заключается в том, что для определения толщины ледопородного ограждения по всему периметру замораживания за пределами его внешней границы требуется пробурить множество дополнительных скважин. Но, как правило, на объектах бурится только одна скважина, что позволяет с достаточной точностью определить толщину ледопородного ограждения локально только в одном месте.

К главному недостатку термометрического способа относится получение ограниченной информации о температуре породного массива как по глубине, так и по площади участка замораживания (в большинстве случаев бурится не более 3-4 контрольно-термических скважин). Кроме этого, при помощи термометрического контроля производятся только периодические измерения температуры замораживаемых горных пород по глубине контрольных скважин, при этом использование для определения температуры сложных электронных и механических устройств в агрессивных условиях окружающей среды зачастую приводит к их поломке, а следовательно, и к потере данных о динамике пространственного и временного теплораспределения. В связи с этим, совместно с развитием и совершенствованием способа искусственного замораживания, внедрялись новые технологии измерения температуры горных пород, основанные на применении оптоволоконной термометрии [32, 50, 101, 115, 126]. Использование в качестве температурного датчика специального волоконного световода, характеризующегося стабильностью и помехозащищенностью, позволило повысить надежность и точность определения температуры горных пород с учетом высокого пространственного разрешения по глубине измерения и длительного срока его эксплуатации в условиях искусственного замораживания. Тем не менее, применение новой технологии измерения температуры не позволило исключить один из главных недостатков — получение информации о температуре горных пород лишь в местах непосредственного расположения контрольно-термических скважин.

На сегодняшний день, как показывает опыт, термометрический способ контроля, несмотря на его несовершенство, является наиболее информативным и достоверным, позволяя непрерывно определять фактические параметры ледопородного ограждения в течение всего срока производства работ по искусственному замораживанию породного массива, а также его размораживанию.

Основы способа термометрического контроля преимущественно представлены в работе [92]. Автор указывает, что для представления хода процесса замораживания горных пород и суждения о состоянии ледопородного ограждения в тот или иной период его существования, необходимо в первую очередь знать температуру пород на отдельных участках. Температуры пород позволяют, с одной стороны, определить границы распространения теплоты, а следовательно, и контур ледопородного ограждения, а с другой стороны — прочность замороженной породы, находящуюся в прямой зависимости от понижения ее температуры. В соответствии с этим термические скважины должны располагаться, во-первых, на границах ледогрунтовой стены, необходимая толщина которой определена расчетом; во-вторых, посередине между двумя замораживающими колонками и, в-третьих, за пределами ледогрунтовой стены для определения степени влияния холода на породу, прилегающую к замороженной породе. Действие холода от замораживающих колонок на изменение температуры породы обычно ограничивается расстоянием 6-7 м от границы ледопородного ограждения. Поэтому контрольную скважину следует располагать на расстоянии 3-4 м от внешней границы ледопородного ограждения. Температуру ледопородного ограждения в том или другом пункте необходимо знать по всей ее высоте. Этим положением определяется глубина термометрических скважин: минимально она должна равняться высоте ледопородного ограждения.

Выполнение термометрического контроля формирования ледопородного ограждения регламентируется нормативными документами [23, 75, 76, 84, 86], согласно которым за состоянием замороженного породного массива должен быть организован систематический контроль, при этом ведение горных работ в условиях искусственного замораживания горных пород разрешается только после образования замкнутого замороженного контура проектной толщины. Однако данные документы не устанавливают единых требований к организации и осуществлению контроля состояния ледопородного ограждения, либо совсем не регламентируют их. В частности не изложены:

- требования к техническим характеристикам термометрического оборудования (пространственное разрешение, точность и периодичность измерений);
- требования к расположению термометрических скважин и последовательности определения мест их заложения с учетом инклинометрии скважин и различия физических свойств замораживаемого обводненного породного массива;

- требования к оптимальному количеству контрольно-термических скважин, обеспечивающему получение наиболее полной информации о температуре горных пород в пределах участка строительства шахтных стволов.

Анализ действующей нормативной документации и существующей технической литературы, регламентирующей и описывающей требования к термометрическому контролю, показал следующее. Правила безопасности [75, 76] устанавливают только общие требования к проходке стволов в условиях искусственного замораживания горных пород, направленные на обеспечение промышленной безопасности. Основное требование правил заключается в обязательном выполнении контроля температуры замораживаемого породного массива, а количество термометрических скважин, их расположение и конструкция должны определяться проектной документацией на проходку ствола специальным способом. Согласно [23], контрольных термометрических скважин, которые располагаются между замораживающими колонками и внешней границей ледогрунтового ограждения, должно быть не менее 10 % от общего количества основных замораживающих скважин. В каждой термометрической скважине должно быть установлено не менее одного термометра. В соответствии с [84, 86] указывается, что для наблюдения за процессом замораживания следует устраивать термометрические скважины. Количество и места их расположения определяются в зависимости от инженерно-геологических условий. В [22] количество контрольно-температурных скважин в каждом случае проектирования принимается в зависимости от сложности условий замораживания пород, но не менее двух. Следует отметить, что ряд работ [43, 66, 97, 100], в том числе перечисленные выше, основаны на принципах способа термометрического контроля, которые получены еще в 1954 г. [92].

На основании анализа, можно сделать вывод, что в существующей литературе отсутствует обоснование технологических параметров способа термометрического контроля, которое включает определение оптимального расположения контрольно-термических скважин, их количество, а также пространственное разрешение измерения температуры горных пород по их глубине. Также не имеется сведений об организации и выполнении контроля ледопородного ограждения в период его размораживания, в то время как оттаивание обводненных горных пород считается одним из наиболее ответственных в строительстве шахтных стволов способом искусственного замораживания. В этот период происходит перераспределение напряжений в породном массиве, крепь ствола получает полную нагрузку, изменяется температура самой крепи. Параллельно с оттаиванием проводятся работы по герметизации тюбинговой крепи (подтяжка болтов, чеканка соединительных швов, дополнительное уплотнение

пикотажных швов) и контрольный тампонаж. Работы по контрольному тампонажу начинают, когда вокруг ствола образуется зона оттаявших пород шириной порядка 1 м и крепь еще находится под защитой ледопородного ограждения [69]. В связи с чем, для успешного перекрытия путей возможного движения подземных вод после возведения крепи шахтного ствола в период размораживания ледопородного ограждения необходимо на основе термометрического контроля затюбингового пространства обеспечить выдачу рекомендаций по его тампонажу.

1.3. Анализ методов расчета параметров ледопородного ограждения в замораживаемом обводненном породном массиве

Большую роль при контроле процесса искусственного замораживания породного массива играет расчет параметров ледопородного ограждения вокруг строящихся шахтных стволов. В целях обеспечения безопасной проходки стволов в водоносных и неустойчивых породах ледопородное ограждение должно иметь необходимую прочность, которая напрямую зависит от его толщины. С одной стороны, толщина должна быть такой, чтобы ограждение обеспечивало невозможность прорыва подземных вод или неустойчивых водоносных горных пород (пльвунов) в строящийся ствол. С другой стороны, толщина ледопородного ограждения должна быть минимальной для решения поставленных задач и минимизации экономических затрат на ее наращивание. Ледопородное ограждение с заданным запасом прочности должно выдерживать внешнюю нагрузку (горное и гидростатическое давления). Кроме этого, чтобы ограждение из мерзлых пород являлось водонепроницаемым, оно должно обладать сплошностью. Поэтому главная задача расчета параметров ледопородного ограждения заключается в определении температурного поля замораживаемого массива горных пород и установлении на основании вычисленного распределения температур его толщины и сплошности.

Замораживание обводненного породного массива является сложным физико-механическим процессом. Ранние исследования формирования мерзлых грунтов пренебрегали процессами массопереноса, но в 1920 году исследования показали, что незамерзшая вода играет ключевую роль в процессе формирования мерзлого грунта [116]. Продолжение исследования данного вопроса в 1924 году позволило представить подробное обсуждение вопроса о замораживании воды в капиллярных системах [124]. В 1935 году был разработан метод расчета понижения температуры замерзания с учетом влияния отрицательного давления поровой воды [163].

Современные исследования показывают, что равновесное содержание незамерзшей воды зависит от температуры и имеет нелинейный характер [150].

Большое число последующих исследований посвящено исследованию вопросов переноса влаги в замерзающих грунтах [114, 120, 121, 125, 134, 136, 142, 143, 152, 153, 157]. Теоретические и экспериментальные исследования данных вопросов были систематизированы в Советском Союзе в работах [27, 37].

В них показано, что при замерзании водонасыщенных грунтов вода из незамерзшей зоны будет постоянно мигрировать в замороженную, что приводит к увеличению содержания воды в последней. Таким образом, при анализе процесса замерзания водонасыщенных грунтов с достаточным содержанием влаги необходимо учитывать изменение влажности. При этом в процессе замораживания грунтов с небольшим содержанием влаги процесс фильтрации воды является более сложным, особенно в случае замкнутых систем. В этом случае увеличение содержания воды в замороженной зоне вызывает уменьшение ее в незамерзшей зоне.

Разработка первой модели для расчета связанного потока воды и тепла для ненасыщенных замораживаемых грунтов, как правило, относится к работе [132]. Позднее данная модель получила развитие в работах [170]. Гидродинамическая модель [132] объясняет некоторые основные особенности переноса воды и тепла при промерзании грунтов, но является грубой для точного описания процесса миграции воды.

Одновременная миграция и кристаллизация влаги в области интенсивного фазового перехода может приводить к запаздыванию образования льда. Исследованию механизмов переноса массы и тепла в области между замороженной и незамерзшей границами посвящены исследования [139, 169]. Наиболее важной проблемой при исследовании процессов переноса воды в замораживаемых грунтах является определение значений материальных параметров. Из-за ограниченного объема экспериментальных данных о параметрах мерзлых грунтов в разное время различными авторами в модели замораживания грунта вводились разнообразные упрощающие предположения [130, 131, 154].

В настоящее время все существующие подходы к описанию процессов замораживания водонасыщенных горных пород и грунтов можно разделить на два больших класса: модели, предполагающие полное превращение воды в лед [144, 151], и модели, учитывающие остаточную влагу после фазового перехода [159, 179].

Изучению тепловых процессов, протекающих в породных массивах в условиях криолитозоны, посвящены работы [48, 104]. Авторами производятся расчеты

температурного режима грунтов в устьевой части вертикальных стволов, учитывающие параметры и режим работы замораживающей системы, и позволяющие определять несущую способность свай фундамента копров в зависимости от температурных условий горных пород и их физико-механических свойств.

Инженерная практика строительства шахтных стволов в сложных гидрогеологических и геологических условиях требует создания простых моделей замораживания водонасыщенных горных пород. В отличие от гидродинамической модели это предполагает использование уравнений, описывающих квазистационарный процесс промерзания.

Исследования закономерностей, посвященные непосредственно прогнозированию параметров ледопородного ограждения в обводненном породном массиве в условиях его искусственного замораживания, опубликованы в работах [15, 20, 30, 59, 81, 93, 110, 133].

Раннюю методологию исследования (50 — 60 гг. XX в.) можно условно разделить на две категории: использование упрощенного метода электротепловой аналогии [30, 59, 93] и решение квазистационарного уравнения теплопроводности с фазовым переходом около одной скважины [25, 29], то есть цилиндрической задачи Стефана [20]. В последние десятилетия ввиду развития вычислительной техники практикуется новый метод исследования — численное моделирование [60], позволяющее получать нестационарное решение для задач с множеством скважин с учетом различных физических процессов. В работах [11, 15, 64] представлен подробный обзор численных методов, применяемых для решения задачи Стефана.

Отдельного внимания заслуживает работа [13], в которой находится аналитическое решение стационарного уравнения теплопроводности в плоском разрезе массива для произвольного количества замораживающих скважин с помощью суперпозиции комплексных потенциалов источников, позволяющее получить неравномерное распределение температур по радиальной и угловой координатам. Для учета неоднородного нестационарного распределения температур в центральной части области, оконтуренной замораживающими скважинами, также используется комплексный потенциал стока, что не совсем обосновано ввиду стационарного характера решения, получаемого с использованием данного потенциала.

В работах [25, 29] решается нестационарная одномерная задача теплопереноса в породном массиве около одной скважины с учетом миграции влаги и ее фазового перехода в твердое состояние. Рассмотрен теплоперенос только в радиальном направлении. Система уравнений задачи сводится к обыкновенному

дифференциальному уравнению, которое решается численно и определяет зависимость $r(t)$ для радиуса ледопородного ограждения. Для записи решения уравнения теплопроводности в талой зоне используется функция ошибок $Erf(x)$ вместо более корректной для цилиндрической задачи интегральной показательной функции $Ei(x)$ [41]. Для записи решения уравнения теплопроводности в зоне льда используется функция логарифма, соответствующая квазистационарному случаю.

Упрощенные аналитические методы расчета параметров ледопородного ограждения имеют по сравнению с методами численного двух- и трехмерного моделирования достоинство, выражающееся в возможности проведения оперативной оценки его состояния. При этом зачастую в данных упрощенных методах не учитываются важные физические процессы: нестационарность тепловой диффузии, конечная скорость фазового перехода, наличие скрытой теплоты фазового перехода, что приводит к существенным погрешностям.

Проведение исследования в диссертационной работе основывается на схеме, описанной в [92], согласно которой сначала определяется точное численное решение задачи Стефана (вычисляется температурное поле) для отдельной скважины, далее полученное решение распространяется на множество скважин посредством метода тепловых потенциалов, аналогичного работе [13]. Но в реальных условиях обводненного породного массива форма ледопородного ограждения с изменяющейся по его контуру толщиной, обусловлена несколькими факторами:

- взаимным расположением замораживающих скважин (отклонением от вертикали);
- различием теплофизических свойств между слагающими породный массив слоями;
- переменной по глубине температурой горных пород;
- вариациями влагосодержания по глубине замораживания;
- потоками подземных вод.

В связи с этим необходимо произвести совершенствование метода решения задачи теплопроводности с фазовым переходом (задачи Стефана), посредством точного учета нестационарной тепловой диффузии, учета теплового влияния соседних замораживающих скважин, а также посредством учета наличия фильтрационных течений.

Кроме этого, следует отметить, что перед началом строительства шахтных стволов на будущей промышленной площадке горного предприятия в пределах участка замораживания породного массива проводятся инженерно-геологические изыскания, которые включают в себя описание строения геологического разреза, исследования гидрогеологических особенностей, исследования физико-механических и

теплофизических свойств образцов горных пород. Полученные на основании изысканий сведения о массиве горных пород в дальнейшем служат исходными данными для определения параметров ледопородного ограждения. В связи с чем результаты расчета термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве, напрямую зависят от используемых в вычислениях физических свойств горных пород. Однако, как показывает практика, теплофизические параметры слоев породного массива, получаемые в результате лабораторных исследований, зачастую имеют высокую погрешность [8, 77, 109, 135], а математические модели, описывающие тепло- и массообменные процессы в обводненных горных породах, построенные с использованием этих параметров, оказываются неэффективными при решении практических задач. Дополнительно погрешность результатов расчета обусловлена неоднородностью и анизотропностью породного массива, а также наличием технологических факторов, оказывающих влияние на процесс искусственного замораживания. На сегодняшний день отсутствуют математические методы, позволяющие уточнять реальные физические свойства горных пород. Таким образом, это ведет к необходимости осуществления предварительной калибровки значений теплофизических параметров слоев горных пород, полученных из инженерно-геологических изысканий, перед их применением для прогнозирования параметров состояния ледопородного ограждения.

С учетом развития технологии термометрического контроля замораживаемого породного массива и вычислительной техники наиболее перспективным методом расчета параметров состояния ледопородного ограждения является задача восстановления теплораспределения во всем объеме участка массива горных пород по экспериментальным измерениям температуры в ограниченном количестве контрольных скважин. Математически это приводит к решению обратной задачи теплопроводности с фазовым переходом (обратной задачи Стефана).

Обратная задача теплопроводности состоит в определении по некоторой дополнительной информации коэффициентов уравнения, граничных или каких-либо других функций, считающихся заданными в прямой задаче. Характерной особенностью обратных задач теплопроводности является некорректность исходной постановки, связанная с возможной неоднозначностью и неустойчивостью их решения, что требует разработки специальных математических методов и вычислительных алгоритмов, а также оптимального планирования и должной технической организации экспериментальных исследований.

Ряд исследований посвящен анализу корректности постановки обратной задачи теплопроводности в общем случае [4, 171] и анализу численных методов их решения [11, 15, 64, 127]. Классически выделяется две группы методов получения устойчивых решений обратных задач: саморегуляризация, когда осуществляется управление мерой близости получаемого решения к точному посредством вариации параметров вычислительных алгоритмов, и регуляризация, подразумевающая построение регуляризующего оператора, сглаживающего функционал и его последующую минимизацию [171]. В литературе также представлен класс методов дескриптивной регуляризации, когда вводятся дополнительные стабилизирующие ограничения для искомого решения [127].

Существенный вклад в развитие теории и методов решения некорректных задач и в построение конкретных регуляризующих алгоритмов внесли Тихонов А.Н., Лаврентьев М.М., Арсенин В.Я., Вайникко Г.М., Васильев Ф.П., Гончарский А.В., Дмитриев В.И., Захаров Е.В., Леонов А.С., Страхов В.Н., Lattes R.L., Lions J.-L. и другие.

Исследование обратных задач для параболических уравнений в областях с заданными границами проведено в работах Алифанова О.М., Безнощенко Н.Я., Вабищевича П.Н., Гласко В.Б., Денисова А.М., Искендерова А.Д., Музылева Н.В., Прилепко А.И., Соловьева В.В., Бек J.V., Lorenzi A., Yamamoto M. и других. Обзор работ для этого класса обратных задач представлен в [4, 10, 28, 158].

Кроме этого, в литературе освещены обратные задачи Стефана, которые составляют класс обратных задач для параболических уравнений в областях с неизвестными подвижными границами. Изучение этого круга проблем началось с обратных задач Стефана для линейных уравнений с заданным движением фазовой границы, которые близки к нехарактеристическим задачам Коши [14, 49, 51, 89, 113, 118, 122].

Общими недостатками существующих методов являются алгоритмическая сложность, существенные затраты вычислительных ресурсов и необходимость дополнительных проверок на сходимость и устойчивость решения. Отмечается, что ранее в существующих исследованиях формирования ледопородного ограждения обратные задачи теплопроводности не рассматривались.

Таким образом, для получения достоверной и наиболее полной информации о температуре замораживаемого породного массива в целях определения фактических параметров ледопородного ограждения необходимо разработать метод решения обратной задачи Стефана на основе применения данных термометрии скважин.

1.4. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка способа контроля состояния замораживаемого участка породного массива на основе данных термометрии скважин при строительстве шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

Для достижения цели требуется решить следующие задачи:

- 1) Разработать метод решения обратной задачи Стефана в замораживаемом породном массиве на основе экспериментальных данных о температуре горных пород в контрольно-термических скважинах шахтного ствола.
- 2) Провести экспериментальные измерения распределения температуры горных пород по всей глубине контрольно-термических скважин.
- 3) Выполнить численное моделирование теплораспределения в обводненном породном массиве с учетом предварительной калибровки его теплофизических свойств и верифицировать полученные модельные результаты с экспериментальными данными.
- 4) Разработать систему термометрического мониторинга состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов, которая позволит определять температуру во всем замораживаемом породном массиве на основе информации о температуре горных пород в ограниченном количестве контрольно-термических скважин.
- 5) Исследовать и обосновать технологические параметры способа термометрического контроля формирования и состояния ледопородного ограждения.
- 6) Разработать технологическое и методическое обеспечение построения системы непрерывного и оперативного контроля состояния ледопородного ограждения.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД

На первом этапе исследования разрабатывается математический метод решения обратной задачи Стефана в обводненном породном массиве в условиях его искусственного замораживания, который в дальнейшем позволит повысить надежность и точность прогнозирования параметров состояния ледопородного ограждения за счет калибровки (уточнения) используемых для расчета теплофизических свойств породного массива, полученных в результате инженерно-геологических изысканий.

2.1. Разработка метода решения обратной задачи Стефана

В настоящее время математическое моделирование процесса замораживания породного массива вокруг строящихся шахтных стволов является неотъемлемой частью контроля формирования и состояния ледопородного ограждения [7, 16, 56, 67, 101, 111, 160, 168, 174]. При помощи численного моделирования представляется возможность рассчитывать теплораспределение во всем объеме участка замораживаемых горных пород, на основании которого в дальнейшем устанавливаются параметры ледопородного ограждения. Главным критерием адекватности применяемой математической модели термодинамических процессов, происходящих в обводненном породном массиве, является эксперимент, то есть сопоставление результатов, получаемых на основе модели с реальными физическими свойствами исследуемых горных пород. Для определения степени соответствия модели породного массива реальному используются данные экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах. При этом, как показывает практика, зачастую модельные значения температуры, вычисленные посредством решения прямой задачи теплораспределения, значительно расходятся со значениями фактических температур пород в скважинах. Несоответствие теоретических и экспериментальных температур объясняется недостаточностью выборки образцов керна и объемов работ по проведению разведочного бурения перед началом строительства шахтного ствола, а также неоднородностью и анизотропностью реального обводненного породного массива.

Таким образом, возникает необходимость разработки метода решения обратной задачи теплопроводности на основе использования дополнительной информации о закономерностях протекания термодинамических процессов в замораживаемом обводненном породном массиве с учетом возможности уточнения его начальных теплофизических свойств, полученных из инженерно-геологических изысканий. Данная

задача особенно актуальна при математической интерпретации результатов термометрии контрольно-термических скважин строящихся шахтных стволов и их использовании для расчета распределения температуры во всем объеме участка породного массива, а также прогнозирования параметров состояния ледопородного ограждения.

2.1.1. Математическая постановка прямой задачи Стефана

Породный массив рассматривается в качестве термодинамической системы, которая представляет собой слоистую структуру и состоит из пористого тела (сухого скелета), полностью заполненного водой. Вода может находиться в жидком или твердом состояниях, то есть, переходить из термодинамической фазы 1 в термодинамическую фазу 2. Сухой скелет при этом не испытывает фазовых превращений. Расчетная область — горизонтальный слой породного массива с круговым контуром вертикально-ориентированных замораживающих скважин, проходящих через данный слой. Помимо замораживающих скважин через слой породного массива проходят контрольно-термические скважины, в которых осуществляется измерение температуры горной породы. Процесс замерзания обводненного породного массива происходит за счет его теплообмена с хладоносителем, циркулирующим в замораживающих скважинах и имеющим температуру ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.1 представлена расчетная область горизонтального слоя породного массива с контуром замораживающих скважин и наличием контрольно-термических скважин.

В соответствии с терминологией [93], зона горных пород с отрицательной температурой, в которой заполняющая поры массива вода (или рассол) обращена в лед, называется зоной льда. Остальная зона горных пород, охлажденная вследствие действия замораживающих скважин до температур, превышающих температуру кристаллизации воды, называется зоной охлаждения.

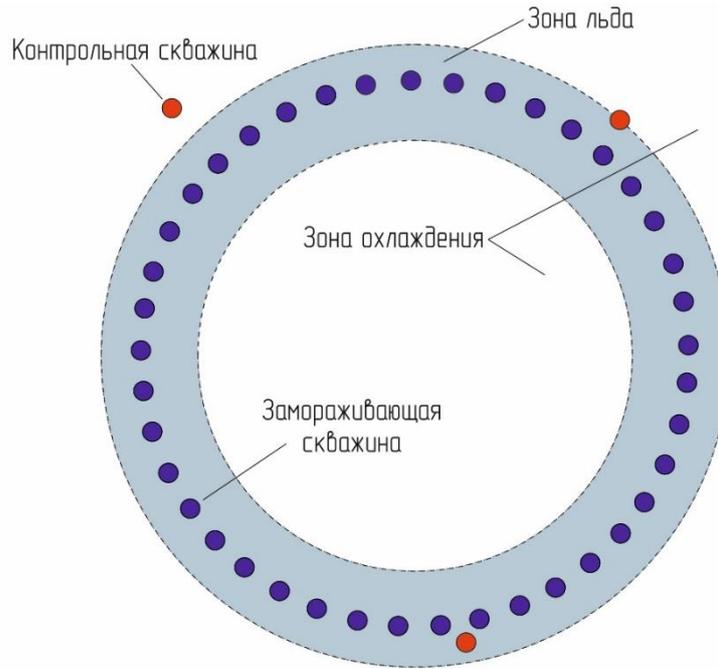


Рисунок 2.1 — Горизонтальный слой породного массива, контур замораживающих скважин, контрольные скважины

В этом случае математическая постановка прямой двумерной двухфазной задачи Стефана в декартовых координатах задается следующей системой уравнений, записанной в энтальпийной постановке [92]:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right], \quad (2.1)$$

$$\lambda = \lambda_{lq}(1 - \phi_{ice}) + \lambda_{sd}\phi_{ice}, \quad (2.2)$$

$$H(T) = \begin{cases} \rho_{lq}c_{lq}(T - T_{p1}) + \rho_{lq}wL, & T_{p1} < T \\ \rho_{lq}wL \cdot (1 - \phi_{ice}), & T_{p2} < T < T_{p1}, \\ \rho_{sd}c_{sd}(T - T_{p2}), & T < T_{p2} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$[\lambda \mathbf{n} \cdot \nabla T - \alpha(T_{fb} - T)]|_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (2.4)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0(h), \quad (2.5)$$

$$T|_{t=0} = T_0(h), \quad (2.6)$$

где H — удельная энтальпия, Дж/м³; x, y — физические координаты, м; T — температура, °С; t — физическое время, сек; $\lambda_{lq}, \lambda_{sd}$ — теплопроводности среды в зонах охлаждения и льда соответственно, Вт/(м·°С); c_{lq}, c_{sd} — удельные теплоемкости среды в зонах охлаждения и льда соответственно, Дж/(кг·°С); ρ_{lq}, ρ_{sd} — плотности среды в зонах охлаждения и льда соответственно, кг/м³; T_{p1}, T_{p2} — температуры начала и конца фазового перехода (полной кристаллизации) соответственно, °С; ϕ_{ice} — объемная доля льда в порах, м³/м³; L — удельная теплота плавления льда, Дж/кг; w — начальное влагосодержание массива, кг/кг; T_{fb} — температура стенок замораживающей скважины,

$^{\circ}\text{C}$; T_0 — температура непо потревоженного породного массива на удалении, $^{\circ}\text{C}$; α — коэффициент теплообмена на границе с замораживающими скважинами, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; h — средняя глубина слоя горной породы, м; $\Omega_{fb} = \cup \Omega_{fbi}$ — границы со всеми замораживающими скважинами $i = 1, \dots, N$; Ω_{out} — внешняя граница области моделирования, \mathbf{n} — координата вдоль нормали к границе Ω_{fb} , м.

Следует отметить, что при разработке месторождений, залегающих в сложных гидрогеологических условиях, особое внимание уделяется изучению их геологического строения [69]. Поэтому при выборе мест заложения шахтных стволов участки с возможным наличием различных тектонических нарушений исключают из рассмотрения. В связи с чем используется гипотеза об однородности и изотропности слоя горных пород. Кроме этого, анализ влияния вертикальной составляющей тепловых потоков через границы слоев горных пород показывает, что величина максимальной ошибки при определении параметров ледопородного ограждения, вызванной пренебрежением вертикальными тепловыми потоками составляет не более 4 % [88]. Вследствие этого используется гипотеза о малости вертикального теплового потока между различными слоями горных пород по сравнению с горизонтальным теплопритоком к замораживающим скважинам. Это позволяет свести задачу к двумерной по пространству.

До начала процесса замораживания обводненный породный массив имеет постоянную естественную температуру, а температура на поверхностях замораживающих скважин считается одинаковой для всех колонок и неизменной во времени. После начала фазового перехода на стенках замораживающих скважин возникают фильтрационные потоки, вызванные термогравитационной конвекцией [156]. Влияние конвективного течения перед фронтом фазового перехода, вызывающего дополнительный приток теплой жидкости, приводит к снижению скорости формирования ледопородного ограждения. Однако, как показывают численные расчеты, отставание фронта кристаллизации через 200 дней после начала замораживания наиболее теплопроводного и имеющего достаточно высокую проницаемость изучаемого слоя горных пород незначительно и составляет не более 8 %. В отличие от термогравитационной конвекции исследование характера влияния постоянного фильтрационного течения в слое горной породы говорит о том, что движение подземных вод существенно влияет на процесс формирования ледопородного ограждения, замедляя его рост [156]. При этом на практике определение скорости и направления движения подземных вод в пределах участка строительства шахтных стволов является трудоемкой

и непростой задачей, поэтому, как правило, не производится. Таким образом, миграция влаги под действием градиентов давления и температуры не рассматривается.

Предполагается, что происходит полное превращение воды в лед, концентрация льда в пористом массиве увеличивается линейно при уменьшении температуры [138, 149], поскольку это хорошо согласуется с лабораторными тестами для образцов рассматриваемых горных пород [8, 77]. В ряде случаев концентрация льда может увеличиваться по более выраженному нелинейному закону [145].

Для прогнозирования параметров состояния ледопородного ограждения применяется численный метод конечных разностей. На рисунке 2.2 приведена используемая для расчетов декартовая конечно-разностная сетка. Выбор в пользу декартовой сетки обусловлен тем, что с увеличением глубины замораживающих скважин их оси существенно смещаются относительно изначального вертикального положения, вследствие чего преимущество, к примеру, полярной сетки пропадает.

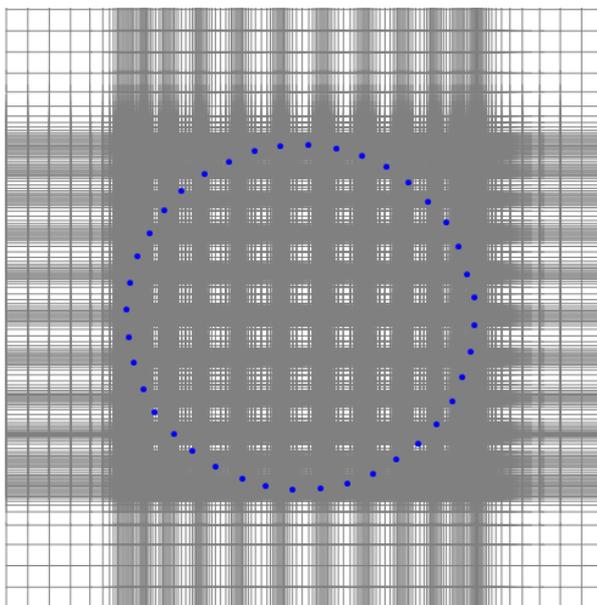


Рисунок 2.2 — Конечно-разностная сетка

Размер сетки на удалении от скважин и сгущение вблизи их выбирались на основании предварительных расчетов таким образом, чтобы обеспечить распределение температур, не зависящее от свойств сетки. На границе с замораживающими скважинами тепловой поток рассчитывался по эффективной площади теплообмена, образованной гранями ячеек, граничных со скважинами. Эффективная площадь теплообмена представлена на рисунке 2.3. При расчете величины теплового потока через эффективную площадь, использовался понижающий коэффициент, равный отношению физической площади теплообмена к эффективной.

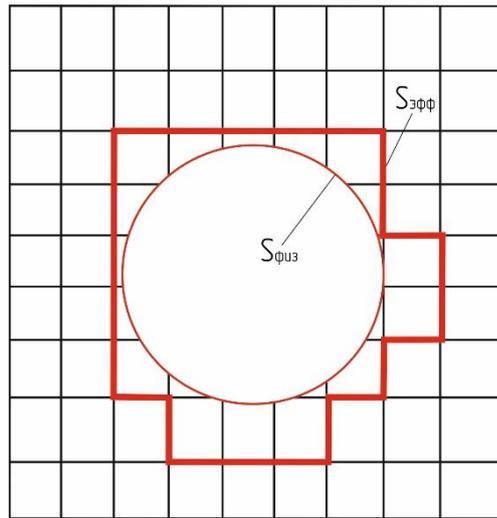


Рисунок 2.3 — Физическая и эффективная поверхности теплообмена замораживающих скважин

Количество ячеек в итоговом варианте сетки, принятой для расчетов, составило 172 040. При численном решении системы уравнений использовалась явная схема первого порядка по времени и второго по пространству. Для ускорения расчетов производилось распараллеливание на ядрах центрального процессора с помощью библиотеки TPL .Net Framework.

Конечно-разностная запись уравнения баланса энергии в энтальпийной постановке имеет следующий вид:

$$\frac{H_{ij}^* - H_{ij}}{\Delta t} = \frac{q_{i+1/2,j} - q_{i-1/2,j}}{\Delta x_{i,j}} + \frac{q_{i,j+1/2} - q_{i,j-1/2}}{\Delta y_{i,j}}, \quad (2.7)$$

$$q_{i+1/2,j} = \frac{\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j}}{2} \cdot \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}}, \quad (2.8)$$

$$q_{i-1/2,j} = \frac{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}}{2} \cdot \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{x_{i,j} - x_{i-1,j}}, \quad (2.9)$$

$$q_{i,j+1/2} = \frac{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}}{2} \cdot \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{y_{i,j+1} - y_{i,j}}, \quad (2.10)$$

$$q_{i,j-1/2} = \frac{\lambda_{i,j-1} + \lambda_{i,j}}{2} \cdot \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}}. \quad (2.11)$$

Здесь H_{ij} и H_{ij}^* — значения удельной энтальпии на старом и новом временном слое соответственно, Дж/м³; Δt — шаг по времени, с; $\Delta x_{i,j}$ и $\Delta y_{i,j}$ — шаги по пространству в направлении осей X и Y соответственно, м; q — тепловой поток, Вт/м;

T — температура, °C; λ — теплопроводность, Вт/(м·°C); индексы i и j нумеруют узлы сетки в направлении осей X и Y соответственно.

Расчет шага по времени осуществляется на основании условия Куранта-Фридрихса-Леви:

$$\Delta t = r \cdot \frac{\lambda_{lq}}{2\rho c_{lq}} \min(\Delta x_{i,j}^2, \Delta y_{i,j}^2). \quad (2.12)$$

Здесь λ_{lq} — теплопроводность талого массива, Вт/(м·°C); c_{lq} — теплоемкость талого массива, Дж/(кг·°C); $r \in (0,1]$ — коэффициент релаксации.

Теплопроводность является функцией влагосодержания. Ее значение в каждом узле (i, j) рассчитывается, исходя из текущего значения концентрации льда ϕ_{ij} в этом узле:

$$\lambda_{ij} = \lambda_{lq}(1 - \phi_{ij}) + \lambda_{sd}\phi_{ij}, \quad (2.13)$$

где λ_{sd} — теплопроводность мерзлого массива, Вт/(м·°C); λ_{lq} — теплопроводность талого массива, Вт/(м·°C).

Конечно-разностная запись граничных условий имеет вид:

$$T_{0,j} = T_{N_x,j} = T_{i,0} = T_{i,N_y} = T_0, \quad (2.14)$$

$$T_{i^*,j^*} - T_{an} = \frac{\alpha \cdot \Delta r}{\lambda_{i^*,j^*}} (T_{an} - T_{ft}(t)), \quad (2.15)$$

где T_{i^*,j^*} — текущее значение температуры в граничном с замораживающими колонками узле (i^*, j^*) , °C; T_{an} — значение температуры, усредненное по всем внутренним узлам расчетной области, соседним с узлом (i^*, j^*) , °C; $T_{ft}(t)$ — температура заморозки, °C; T_0 — температура непотревоженного массива, °C; α — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°C); Δr — усредненное расстояние между узлом (i^*, j^*) и всеми внутренними соседними по отношению к нему узлами.

Конечно-разностная запись начального условия:

$$T_{i,j} = T_0. \quad (2.16)$$

Расчет энтальпии и влагосодержание в узлах конечно-разностной сетки производится по формулам, приведенным при описании математической модели.

2.1.2. Математическая постановка обратной задачи Стефана

Перед началом строительства шахтных стволов с целью получения комплексной информации о геологических и гидрогеологических условиях замораживаемого породного массива на промышленной площадке проводятся инженерно-геологические изыскания, включающие в себя исследования физико-механических и теплофизических свойств образцов горных пород, отобранных из контрольно-стволовых скважин. Однако теплофизические расчеты, использующие эти полученные параметры породного массива, оказываются неэффективными при решении практических задач. Данный факт свидетельствует о необходимости проведения калибровки начальных теплофизических параметров горных пород. Математически это приводит к постановке обратной задачи теплопроводности. Но первоначально следует определить калибруемые расчетные параметры из множества теплофизических свойств горных пород, после чего разработать автоматизированный метод калибровки, основанный на решении коэффициентной обратной задачи Стефана [57].

В качестве параметров калибровки выступают теплофизические свойства горных пород, слагающих замораживаемый породный массив. Отмечается, что повышенная погрешность их определения в ходе инженерно-геологических изысканий вызвана следующими факторами:

1. недостаточностью выборки образцов керна и объемов работ по проведению разведочного бурения перед началом строительства шахтного ствола;
2. неоднородностью и анизотропностью реального обводненного породного массива.

Дополнительными факторами, приводящими к погрешности математической модели и также требующими калибровки параметров модели, являются технологические факторы:

- наличие пустот между породным массивом и стенками замораживающих скважин вследствие некачественного выполнения работ по тампонажу затрубного пространства скважин;
- наличие отклонения проектных положений осей скважин от вертикали, обусловленного несовершенством процедуры бурения скважин, и погрешность в измерении этого отклонения (погрешность инклинометрии скважин).

Первый фактор ухудшает интенсивность теплообмена, в то время как второй фактор приводит к погрешности при локализации источников теплоты для каждого слоя горных пород. Рассмотрение данных двух технологических факторов указывает на то,

что теплофизические свойства среды, которые требуется определить в ходе процедуры калибровки, не являются истинными теплофизическими свойствами этой среды, а представляют собой некоторые эффективные значения.

Количество параметров, по которым можно произвести калибровку математической модели, определяется, исходя из вида самой математической модели. А именно — исходя из количества независимых безразмерных комплексов, от которых зависит получаемое решение — распределение температуры в массиве и объемной доли льда в порках.

Для того чтобы перейти к записи системы уравнений (2.1) — (2.6) в безразмерном виде, вводятся следующие безразмерные переменные:

$$X = \frac{x}{l}, Y = \frac{y}{l}, \tau = \frac{t}{t_{\Sigma}}, \theta = \frac{T - T_0}{T_{fb} - T_0}, H = \frac{H}{\rho_{sd} w L}, \quad (2.17)$$

где X, Y — безразмерные координаты; τ — безразмерное время; θ — безразмерная температура замораживания; H — безразмерная энтальпия.

Безразмерные теплофизические комплексы — чисел Фурье Fo и Стефана Ste определяются следующим образом:

$$Fo_i = \frac{\lambda_i \Delta t}{\rho_i c_i L^2}, \quad Ste_i = \frac{c_i (T_0 - T_{fb})}{w L}. \quad (2.18)$$

В этом случае двумерная двухфазная задача Стефана (2.1) — (2.6) в безразмерных координатах для горизонтального слоя горных пород имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(\theta)}{\partial \tau} = Fo_{sd} Ste_{sd} \left\{ \frac{\partial}{\partial X} \left[1 + \phi_{ice} \left(\frac{\lambda_{lq}}{\lambda_{sd}} - 1 \right) \right] \frac{\partial \theta}{\partial X} \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial Y} \left[1 + \phi_{ice} \left(\frac{\lambda_{lq}}{\lambda_{sd}} - 1 \right) \right] \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right\}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial N} - Bi(\theta_{fb} - \theta) \right] \Big|_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (2.20)$$

$$\theta|_{\Omega_{out}} = 0, \quad (2.21)$$

$$\theta|_{\tau=0} = 0, \quad (2.22)$$

$$H(\theta) = \begin{cases} Ste_{lq}(\theta - \theta_{p1}) + 1, & \theta_{p1} < \theta \\ \phi_{ice}, & \theta_{p2} < \theta < \theta_{p1}, \\ Ste_{sd}(\theta - \theta_{p2}) \rho_{lq} / \rho_{sd}, & \theta < \theta_{p2} \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\phi_{ice}(H) = \begin{cases} 1, & H < 0 \\ H, & 0 < H < 1. \\ 0, & 1 < H \end{cases} \quad (2.24)$$

Здесь θ_{fb} — безразмерная температура стенок замораживающей скважины; T — безразмерная температура непоколебленного массива; N — безразмерная координата вдоль нормали к границе Ω_{fb} ; Bi — число Био, определяемое по формуле:

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_{lq}}. \quad (2.25)$$

Система уравнений (2.19) — (2.24) позволяет найти распределение температур θ как функцию 2 безразмерных координат X и Y , 2 безразмерных температур фазового перехода θ_{p1}, θ_{p2} и 6 безразмерных комплексов: $Fo_{sd}, Ste_{sd}, Ste_{lq}, Bi, \rho_{lq}/\rho_{sd}, \lambda_{lq}/\lambda_{sd}$.

В условиях высокого гидростатического напряжения горных пород на глубине плотность горных пород меняется несущественно, поэтому комплекс ρ_{lq}/ρ_{sd} исключен из рассмотрения.

Поскольку в рассматриваемой модели отсутствует миграция влаги, влагосодержание водонасыщенного массива в твердой и жидкой фазах одинаково. Таким образом, в этом случае вместо критерия $\lambda_{lq}/\lambda_{sd}$ взят критерий Fo_{lq} , выражаемый через другие критерии.

$$\frac{\lambda_{lq}}{\lambda_{sd}} = \frac{Fo_{lq} Ste_{lq}}{Fo_{sd} Ste_{sd}}. \quad (2.26)$$

Выражение (2.26) записано при условии равных плотностей массива в охлажденном и мерзлом состояниях.

В результате, с учетом принимаемых упрощений, решение задачи (2.19) — (2.24) зависит от 5 безразмерных комплексов, в которых содержится информация о теплофизических свойствах рассматриваемой среды: $Fo_{sd}, Fo_{lq}, Ste_{sd}, Ste_{lq}, Bi$, а также от двух безразмерных температур θ_{p1}, θ_{p2} , характеризующих фазовый переход.

В наиболее простом случае в качестве параметров калибровки модели теплопереноса в системе «массив-контур замораживающих скважин» принимаются до 5 теплофизических свойств, входящих в безразмерные комплексы, представленные выше. В более сложном случае дополнительно рассматривается условие минимального интегрального отклонения калибруемых теплофизических параметров p_i от своих начальных значений $p_i^{(0)}$, полученных из инженерно-геологических изысканий. Для этого выбирается следующий функционал с нормой из пространства L_2 .

$$F = \sqrt{\sum_i (p_i - p_i^{(0)})^2} \rightarrow min. \quad (2.27)$$

В этом случае количество параметров калибровки может быть выбрано большим.

В данном исследовании не рассматриваются условия минимального интегрального отклонения калибруемых теплофизических параметров от своих начальных значений. Также в данном исследовании принимается, что температуры начала и конца фазового перехода неизменны.

Следует отметить, что цель анализа прямой задачи Стефана в безразмерных величинах заключается в определении количества безразмерных комплексов, от которых зависит решение — поле температур.

Калибровка теплофизических параметров задачи (2.1) — (2.6) представляет собой решение коэффициентной обратной задачи Стефана [4, 5, 171]. Для формулировки обратной задачи переопределим прямую задачу (2.1) — (2.6) посредством введения заданных измеренных температур $T_i^{(c)}(t)$ в месте расположения (x_i, y_i) каждой контрольно-термической скважины № i .

$$T(t, x, y) = T_i^{(c)}(t), i = 1, \dots, N_c, \quad (2.28)$$

где N_c — количество контрольно-термических скважин.

Таким образом, решение обратной задачи Стефана в данном случае состоит в определении поля температур $T(t, x, y)$ и значений теплофизических параметров горных пород, удовлетворяющих системе уравнений (2.1) — (2.6), (2.28).

В данной работе вместо жесткого условия (2.28) рассматривался функционал рассогласований, теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных температур в контрольных скважинах.

$$I = \sum_{i=1}^{N_c} \int_0^{t_\Sigma} (T_i^{(c)} - T_i^{(m)}) dt, \quad (2.29)$$

где $T_i^{(c)}$ — экспериментальная температура в i -й скважине, °C; $T_i^{(m)}$ — модельная температура в i -й скважине, °C; t_Σ — время замораживания, сут.

В этом случае решение обратной задачи Стефана заключается в минимизации функционала (2.29) с учетом условий (2.1) — (2.6).

2.1.3. Исследование функционала рассогласований температур

Выполнено исследование вида функционала I в фазовом пространстве теплофизических свойств породного массива. Для этого проведен многопараметрический численный расчет прямой двумерной задачи Стефана для горизонтального слоя горной породы. Применялся метод конечных разностей, явная схема для энтальпийной постановки задачи Стефана на регулярной неоднородной декартовой сетке со сгущениями вблизи замораживающих скважин.

Расчет проводился для следующего набора параметров: радиус замораживающих скважин — 0,073 м; количество замораживающих скважин — 40; радиус кругового контура замораживающих скважин — 8,5 м; ширина и высота расчетной области — 30 м; плотность массива в охлажденном и мерзлом состоянии — 2000 кг/м³; влагосодержание массива в охлажденном и мерзлом состоянии — 0,2 кг/кг; температура рассола в замораживающих скважинах — -20 °С; расход рассола в замораживающих скважинах — 10 м³/час; температура непо потревоженного массива — +10 °С; температура начала кристаллизации подземных вод — 0 °С; температура полной кристаллизации подземных вод — -1 °С; время расчета — 15 суток; количество контрольных скважин — 1.

В качестве замеренной температуры на контрольно-термической скважине принималась функция $T_c(t)$, полученная в результате решения прямой задачи Стефана для параметров: теплоемкость охлажденной породы — 900 Дж/(кг·°С); теплоемкость мерзлой породы — 700 Дж/(кг·°С); теплопроводность охлажденной породы — 3 Вт/(м·°С); теплопроводность мерзлой породы — 4 Вт/(м·°С).

В результате многопараметрического численного расчета прямой задачи Стефана получены зависимости функционала рассогласований температур от теплофизических свойств — теплопроводностей и теплоемкостей мерзлого и охлажденного массива, а также влагосодержания.

Функционалы рассогласования температуры в контрольно-термических скважинах в зависимости от теплофизических свойств горной породы, применяемой для расчета, представлены на рисунке 2.4.

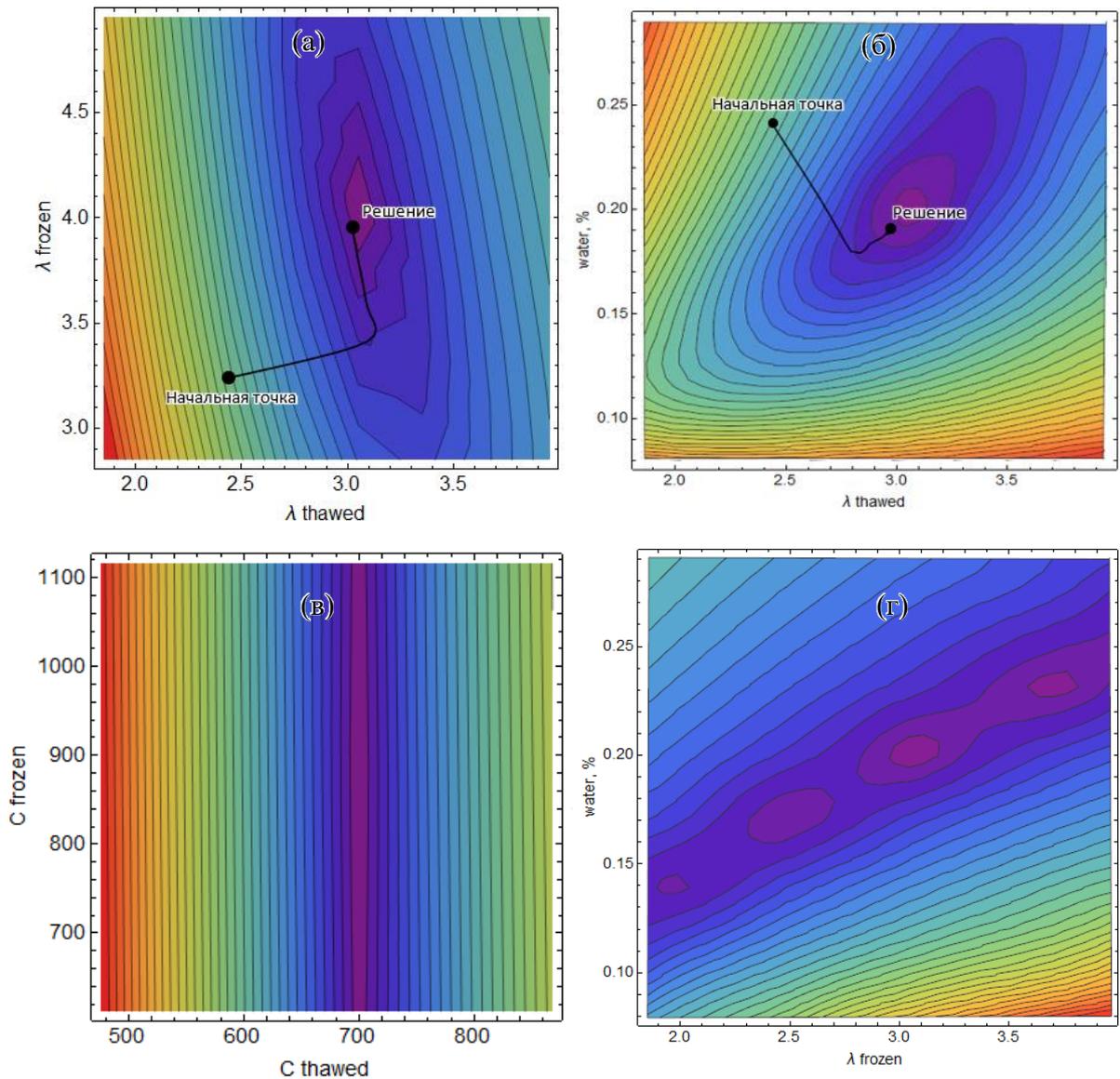


Рисунок 2.4 — Функционал рассогласований температуры пород в контрольно-термических скважинах:

- а) — как функция теплопроводностей охлажденной и мерзлой породы, б) — как функция теплопроводности охлажденной породы и влагосодержания, в) — как функция теплоемкостей охлажденной и мерзлой породы, г) — как функция влагосодержания и теплопроводности мерзлой породы

Из рисунка 2.4а видно, что функционал рассогласований температуры имеет ярко выраженный минимум на фазовой плоскости изменения теплопроводностей горной породы. С течением времени изолинии функционала рассогласования на плоскости теплопроводностей породы стремятся от вытянутой эллипсоидальной формы к круговой, что обусловлено увеличением зоны мерзлой породы и повышением влияния ее теплопроводности на поле температур. На малых временах моделирования, когда зона льда занимает сравнительно малую часть расчетной области, влияние теплопроводности мерзлой породы проявляется в граничном условии на скважинах, определяемых числом Bi , и на фронте фазового перехода в комплексе Fo_{lq}, Ste_{lq} .

Из рисунка 2.4в следует, что функционал рассогласований температуры почти не зависит от теплоемкости мерзлой породы для рассматриваемого случая, это связано с тем, что на малых временах распределение температур в зоне льда устанавливается намного быстрее, чем движется граница фазового перехода. Поэтому теплопроводность мерзлой породы как мера инертности распределения теплоты в нем не играет (в данном диапазоне своих значений) существенной роли.

Из рисунка 2.4г можно сделать вывод, что при малых временах также наблюдается неоднозначность в определении влагосодержания и теплопроводности мерзлого массива. При рассмотрении функционала рассогласования температуры как функцию влагосодержания и теплопроводности охлажденной породы, такой неоднозначности не выявлено, и функционал (2.29) имеет явный минимум, о чем свидетельствует рисунок 2.4б. Это обусловлено тем, что при малых временах решение зависит от комплекса Fo_{lq}, Ste_{lq} (тепловой поток к мерзлой породе), в котором влагосодержание и теплопроводность мерзлой породы присутствуют только в виде отношения.

2.1.4. Метод решения обратной задачи Стефана

Минимизация функционала (2.29) в фазовом пространстве теплофизических свойств породного массива осуществляется с использованием модификации метода градиентного спуска [19, 140]. На каждой итерации алгоритма $N+1$ раз решается прямая задача Стефана для определения частных производных функционала I по N различным параметрам минимизации.

Пусть $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$ — вектор калибруемых параметров задачи; I — текущее значение функционала рассогласования, представляющее собой также ошибку расчета обратной задачи; ε_{max} — максимально допустимая ошибка решения обратной задачи. Тогда предложенный алгоритм включает в себя следующие шаги:

1. Определение начальных приближений $\mathbf{p}^{(0)}$.
2. Расчет прямой задачи Стефана, определение текущей ошибки I по формуле (2.29), сравнение с максимально допустимой ошибкой ε_{max} . Если $I < \varepsilon_{max}$, то требуемая точность достигнута и следует завершить расчет, иначе — переход к шагу 3.
3. Выбор малых отклонений калибруемых параметров $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$ на k -й итерации алгоритма. Расчет прямой задачи Стефана для каждой компоненты вектора $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$. Вычисление частных производных функционала I :

$$\frac{\Delta I^k}{\Delta p_i} = \frac{I(p_i^k + \Delta p_i) - I(p_i^k)}{\Delta p_i},$$

$$\nabla I^k = \left(\frac{\Delta I^k}{\Delta p_1}, \dots, \frac{\Delta I^k}{\Delta p_n} \right).$$
(2.30)

4. Расчет новых значений калибруемых параметров на (k+1)-й итерации задачи по формуле:

$$\Delta \mathbf{p}^k = \mu \Delta \mathbf{p}^{k-1} + (1 - \mu) I^k \cdot \frac{\nabla I^k}{|\nabla I^k|},$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \sigma \Delta \mathbf{p}^k,$$
(2.31)

где $\mu \in [0,1)$ — параметр, характеризующий фактор предыстории, $\sigma > 0$ — параметр, определяющий скорость градиентного спуска.

5. Проверка на невыход параметров калибровки из области допустимых значений, которые устанавливаются на основании анализа результатов инженерно-геологических изысканий.

$$p_i^k \in [p_{i \min}, p_{i \max}].$$
(2.32)

6. Если превысили максимальное количество итераций, то необходимо завершить расчет, иначе — возврат к шагу 2.

На рисунках 2.4а и 2.4б представлено решение обратной задачи Стефана с помощью данного алгоритма для параметров $\mu = 0,4$ и $\sigma = 1,0$.

2.2. Корректировка параметров математической модели

На основе разработанного метода решения обратной задачи Стефана для условий рудника Талицкого ГОК выполнен сравнительный анализ значений теплофизических параметров замораживаемого породного массива, полученных из инженерно-геологических изысканий и откалиброванных с учетом фактических экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах строящихся шахтных стволов. Сравнительный анализ выполнен в терминах безразмерных комплексов (2.18).

На рисунках 2.5 и 2.6 приведены относительные рассогласования начальных и откалиброванных теплофизических свойств горных пород для условий шахтных стволов рудника Талицкий ГОК.

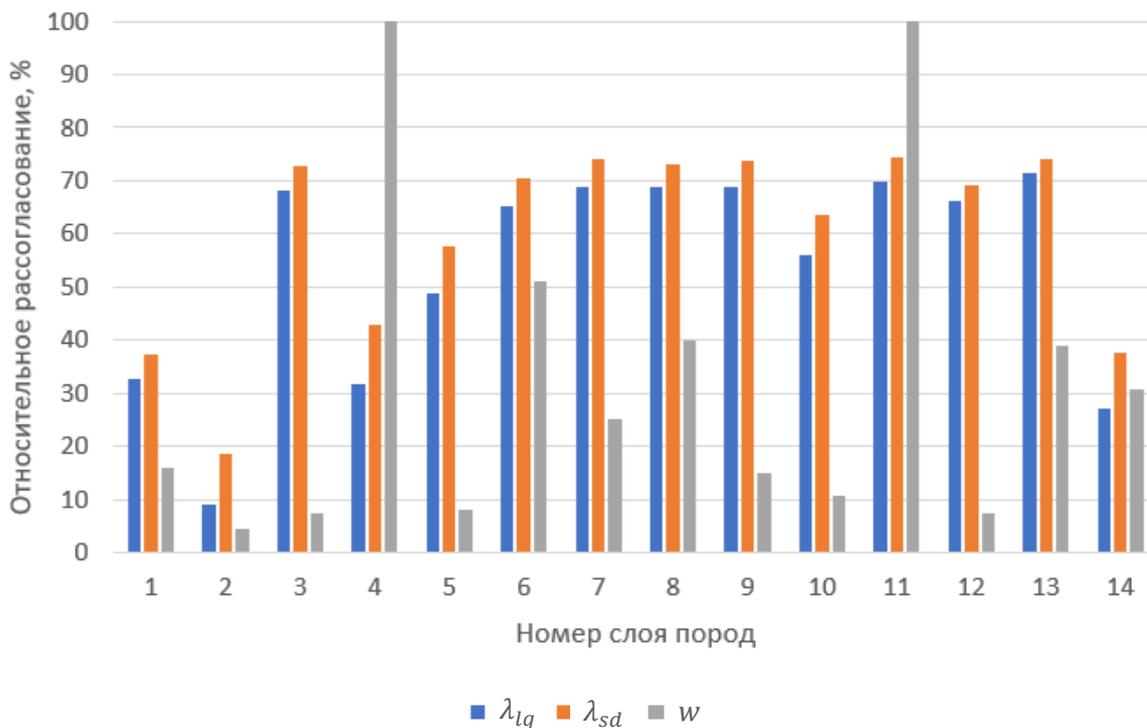


Рисунок 2.5 — Относительные рассогласования теплофизических свойств горных пород для условий ствола № 1 Талицкого ГОК:

λ_{sd} — теплопроводность мерзлой породы, λ_{lq} — теплопроводность охлажденной породы w — влагосодержание породы

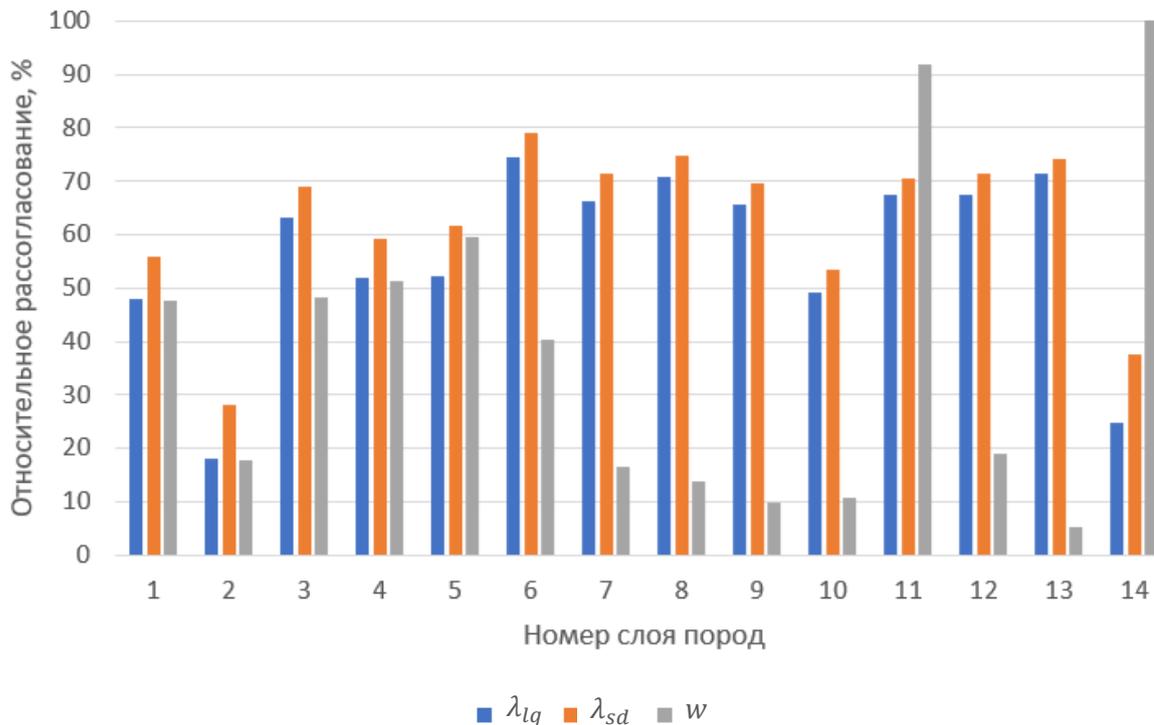


Рисунок 2.6 — Относительные рассогласования теплофизических свойств горных пород для условий ствола № 2 Талицкого ГОК:

λ_{sd} — теплопроводность мерзлой породы, λ_{lq} — теплопроводность охлажденной породы w — влагосодержание породы

Из расчетов следует, что откалиброванные значения теплопроводностей в отдельных слоях горных пород отличаются от начальных более чем на 70 %, а влагосодержание массива — более чем на 100 %. Откалиброванные значения теплопроводностей выше начальных, полученных из инженерно-геологических изысканий. Откалиброванные значения влагосодержания также выше начальных. Данная тенденция справедлива как для случая ствола № 1, так и для случая ствола № 2. Таким образом, в случае замораживания породного массива по начальным параметрам, принятым из инженерно-геологических изысканий, процесс формирования ледопородного ограждения происходит существенно медленнее, чем это следует из данных термометрии контрольных скважин шахтных стволов.

Необходимо отметить, что в ходе выполнения контроля за формированием и состоянием ледопородного ограждения основным фактором, свидетельствующим о необходимости осуществления корректировки математической модели, является предельное отклонение рассчитанной температуры горных пород от фактической, измеряемой в контрольно-термических скважинах. Предельно допустимое отклонение модельной температуры от фактической должно составлять не более 1,5 °С. Анализ отклонений значений температур на основании данных экспериментальных измерений в контрольно-термических скважинах шахтных стволов производится еженедельно. Как правило, калибровка теплофизических параметров математических моделей осуществляется примерно один раз в три месяца. Принципы измерений температуры горных пород по глубине контрольных скважин приведены в разделе 3.1.

2.3. Исследование влияния технологических факторов на состояние ледопородного ограждения при проходке шахтного ствола

Процесс искусственного замораживания породного массива принято делить на периоды формирования и поддержания ледопородного ограждения требуемых параметров: активное замораживание — образование ледопородного ограждения до начала проходки шахтного ствола; пассивное замораживание — поддержание сформированного ограждения в замороженном состоянии до возведения постоянной крепи. Для получения достоверных данных о тепловом поле в период пассивного замораживания, когда производится непосредственно проходка шахтного ствола требуется учитывать различные технологические факторы, влияющие на состояние ледопородного ограждения.

В период пассивного замораживания параметры ледопородного ограждения при проходке шахтного ствола зависят от следующих основных технологических факторов:

- теплообмен горных пород с воздухом;
- выделение тепла гидратации цемента при твердении бетона во время возведения крепи ствола.

Для исследования указанных факторов выполнено численное моделирование методом конечных элементов в программном пакете Ansys Multiphysics. Решается нестационарная задача теплопроводности в обводненном массиве горных пород с движущейся границей фазового перехода (задача Стефана). Геометрия расчётной области считается аксиально-симметричной, а физические свойства исследуемой среды — однородными и изотропными.

Для моделирования приняты следующие геометрические и теплофизические параметры: радиус незакрепленной части ствола — 5 м, радиус замораживающих скважин — 0,073 м, расстояние от центра ствола до центра замораживающих скважин — 8,25 м, расстояние между устьями замораживающих скважин — 1,26 м, радиус расчетной области — 25 м, высота расчетной области — 12 м, плотность пород $\rho = 1860 \text{ кг/м}^3$, влагосодержание $w = 0,29 \text{ кг/кг}$, удельная теплоемкость среды в зоне охлаждения $c_{lq} = 1489 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, удельная теплоемкость среды в зоне льда $c_{sd} = 1051 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, теплопроводность среды в зоне охлаждения $\lambda_{lq} = 1,79 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, теплопроводность среды в зоне льда $\lambda_{sd} = 3,10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, температура непо потревоженного породного массива $T_0 = +6,4 \text{ }^\circ\text{C}$, температура фазового перехода $T_{ph} = -0,12 \text{ }^\circ\text{C}$, удельная теплота плавления льда $L = 333,73 \text{ кДж/кг}$.

Теплообмен между воздухом и слоем горной породы

Для оценки максимального влияния теплообмена между рудничным воздухом и слоем горной породы на рост ледопородного ограждения приняты следующие допущения:

1. теплообмен происходит напрямую между воздухом и слоем горной породы без учета бетонной и тубинговой крепи, которые оказывают теплоизолирующее воздействие;
2. температура воздуха постоянна и равна $+25 \text{ }^\circ\text{C}$;
3. скорость воздуха принимается постоянной и составляет $V = 0,2 \text{ м/с}$, что соответствует минимально допустимой скорости в стволе;
4. коэффициент теплоотдачи между рудничным воздухом и горной породой вычисляется по формуле [107]:

$$\alpha = 3,4 \frac{V^{0,8}}{d^{0,2}} = 0,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.33)$$

5. теплообмен с воздухом происходит в течение 90 суток.

На рисунке 2.7 представлена геометрия расчетной области.

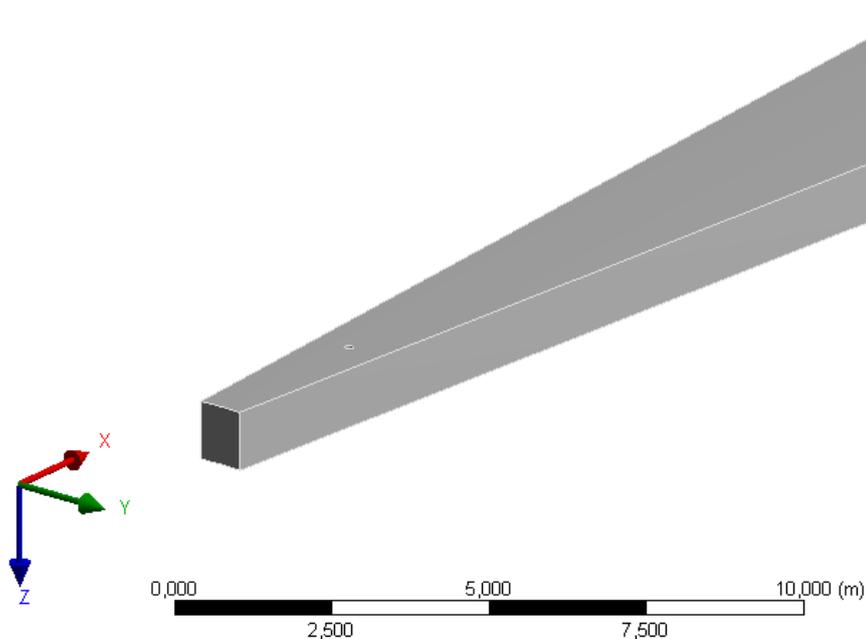


Рисунок 2.7 — Геометрия расчетной области для решения задачи влияния теплообмена между рудничным воздухом и слоем горной породы

На рисунке 2.8 представлено распределение температур в исследуемой расчетной области спустя 210 суток после начала замораживания.

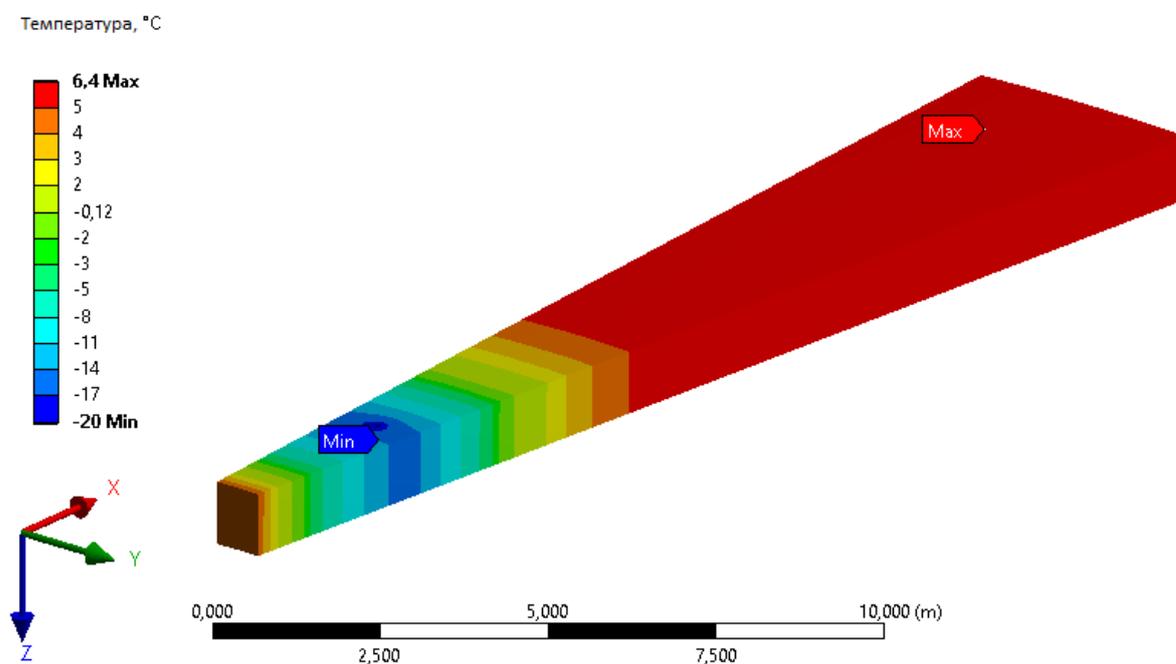


Рисунок 2.8 — Распределение температур в исследуемой области в момент времени 210 суток с начала замораживания

Отмечается, что рост внутренней поверхности ледопородного ограждения снижается, в то время как на скорость роста его внешней поверхности исследуемый фактор не влияет.

На рисунке 2.9 представлены графики зависимости толщины ледопородного ограждения от времени с учетом и без учета влияния теплообмена с рудничным воздухом.

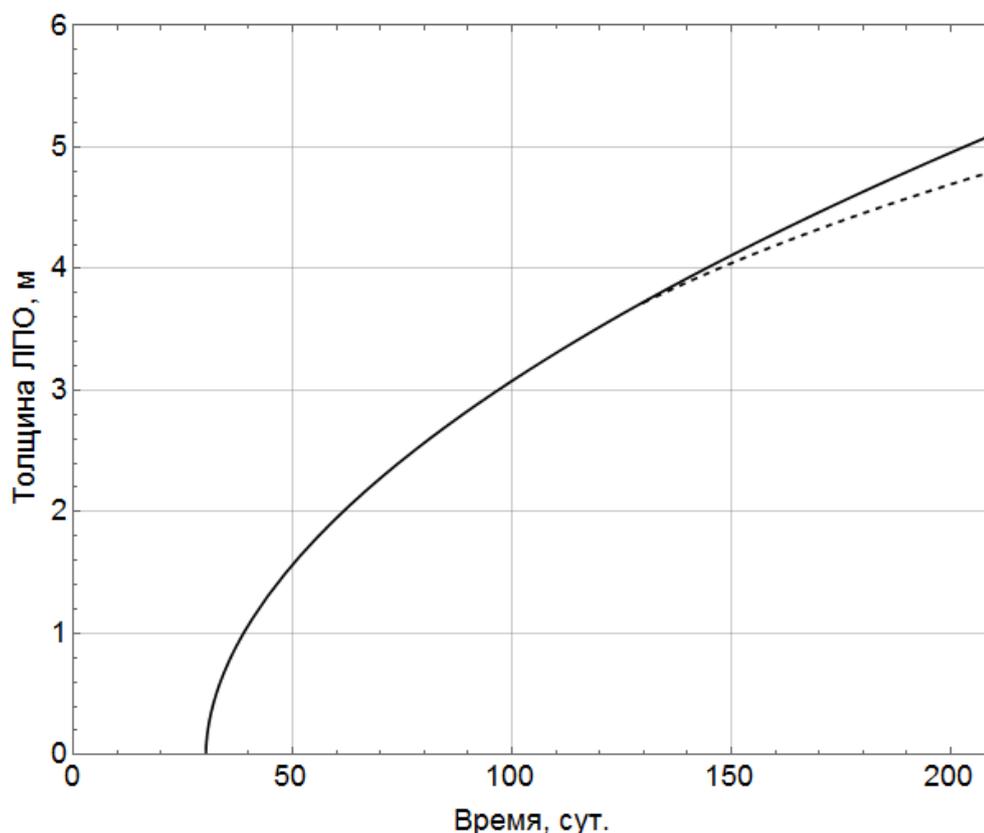


Рисунок 2.9 — Зависимость толщины ледопородного ограждения от времени с учетом (штриховая линия) и без учета (сплошная линия) влияния теплообмена с воздухом

Таким образом, можно сделать вывод, что теплообмен горных пород с воздухом не сокращает толщину ледопородного ограждения, а лишь замедляет скорость ее роста.

Тепловыделение при твердении бетона

Произведена оценка влияния экзотермической реакции гидратации цемента на состояние ледопородного ограждения при твердении бетона во время возведения крепи шахтного ствола. Для оценки влияния этого фактора приняты следующие параметры: толщина бетонной крепи — 1 м, высота слоя твердеющей бетонной крепи — 4 м, высота слоя затвердевшей бетонной крепи — 4 м, на внешней поверхности — теплообмен с породным массивом, на внутренней — теплообмен с воздухом постоянной температуры равной +25 °С и коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 0,59 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Бетон имеет следующие теплофизические параметры: плотность — 2500 кг/м^3 , теплопроводность — $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, удельную теплоемкость — $840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, начальная температура — +29 °С.

В момент времени 120 суток после начала замораживания смоделировано тепловыделение в результате гидратации цемента при твердении бетона. Продолжительность тепловыделения 24 часа, при этом теплота, высвободившаяся за это время на 1 кг массы бетона, равна 73 688 Дж/кг согласно данным лабораторных исследований.

На рисунке 2.10 изображена геометрия расчетной области.

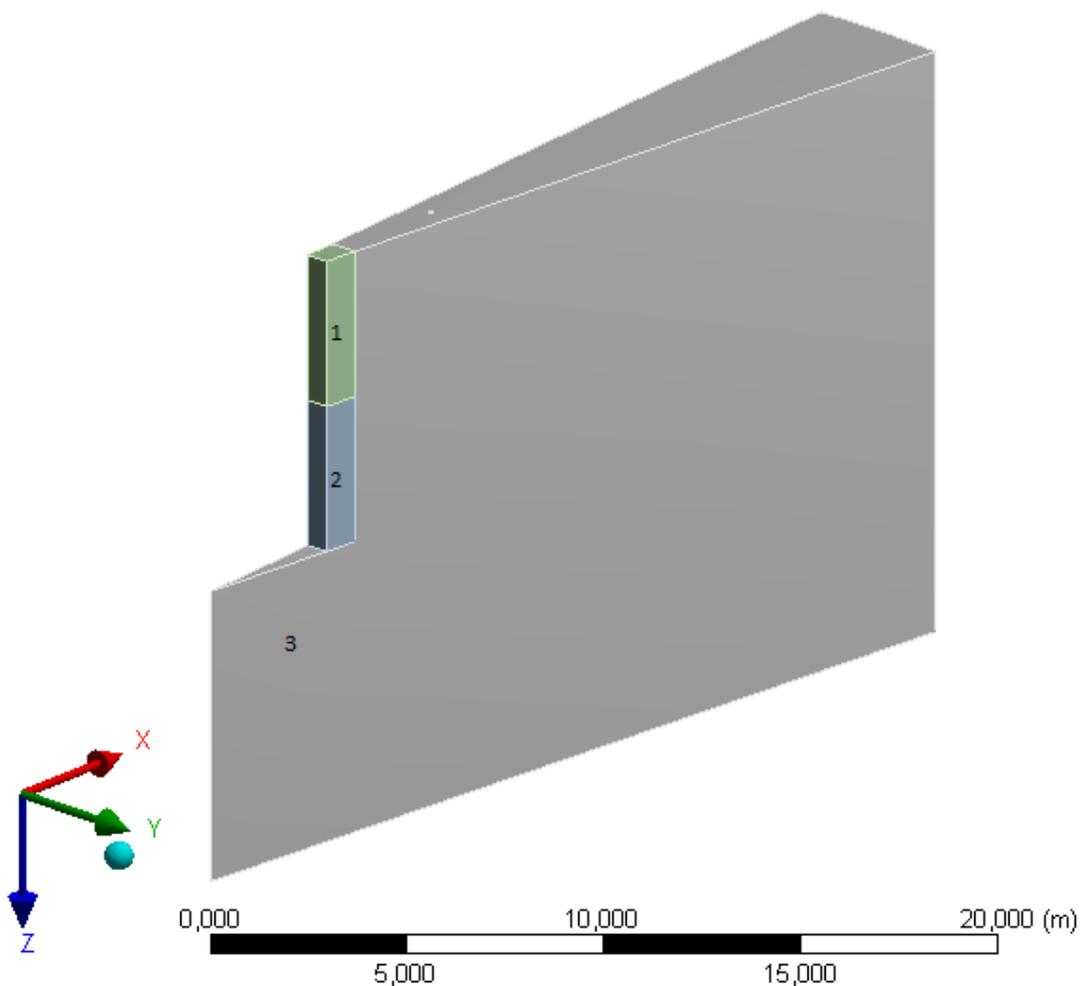


Рисунок 2.10 — Геометрия расчетной области для решения задачи влияния экзотермической реакции гидратации цемента при твердении бетона:
1 — слой затвердевшего бетона, 2 — слой твердеющего бетона, 3 — слой горной породы

На рисунке 2.11 изображено распределение температур в исследуемой расчетной области спустя 210 суток после начала замораживания.

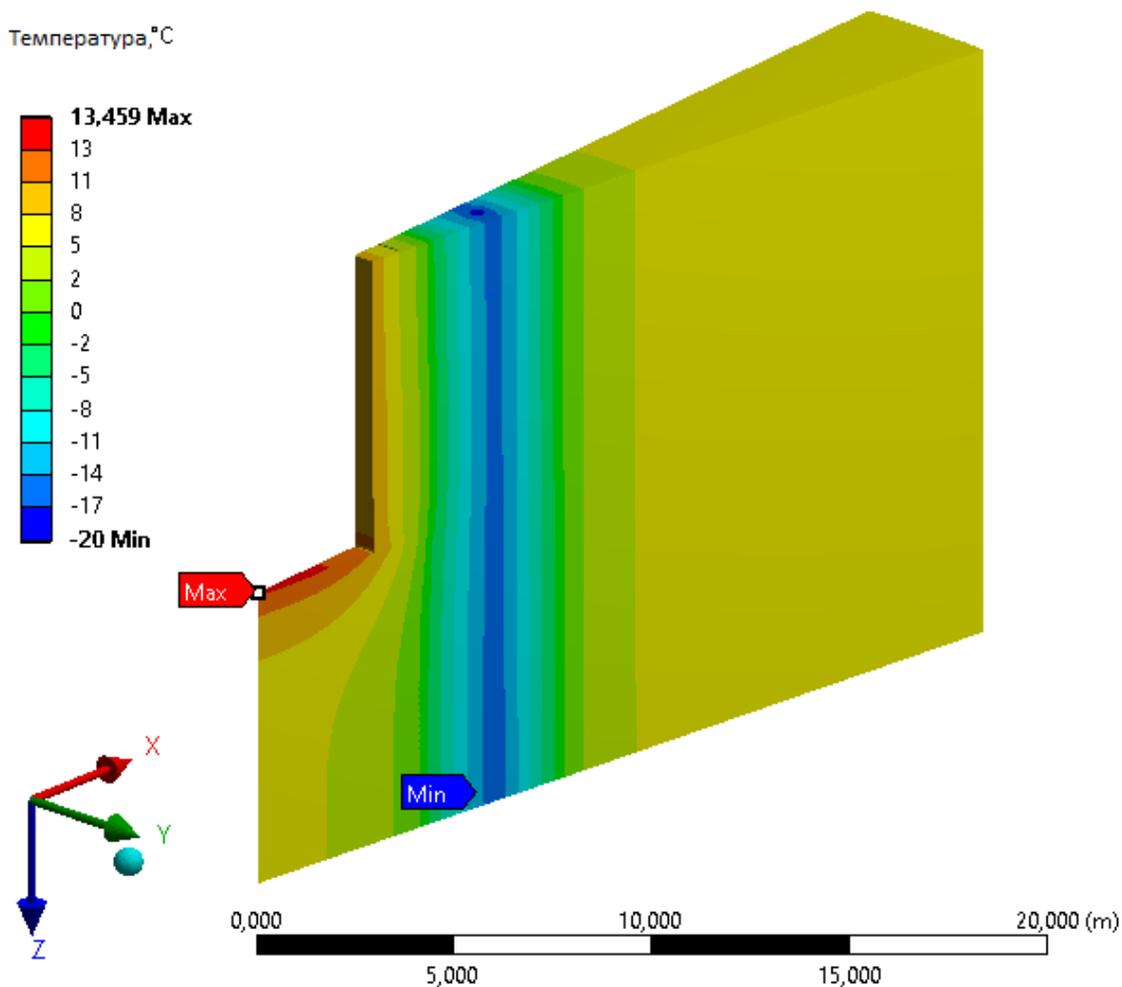


Рисунок 2.11 — Распределение температур в исследуемой области в момент времени 210 суток с начала замораживания

Из рисунка 2.11 видно, что тепловыделения от экзотермической реакции гидратации цемента влияют на скорость роста толщины ледопородного ограждения. На рисунке 2.12 представлены графики зависимости толщины ледопородного ограждения от времени с учетом и без учета влияния твердения бетона в двумерном и трехмерном случае.

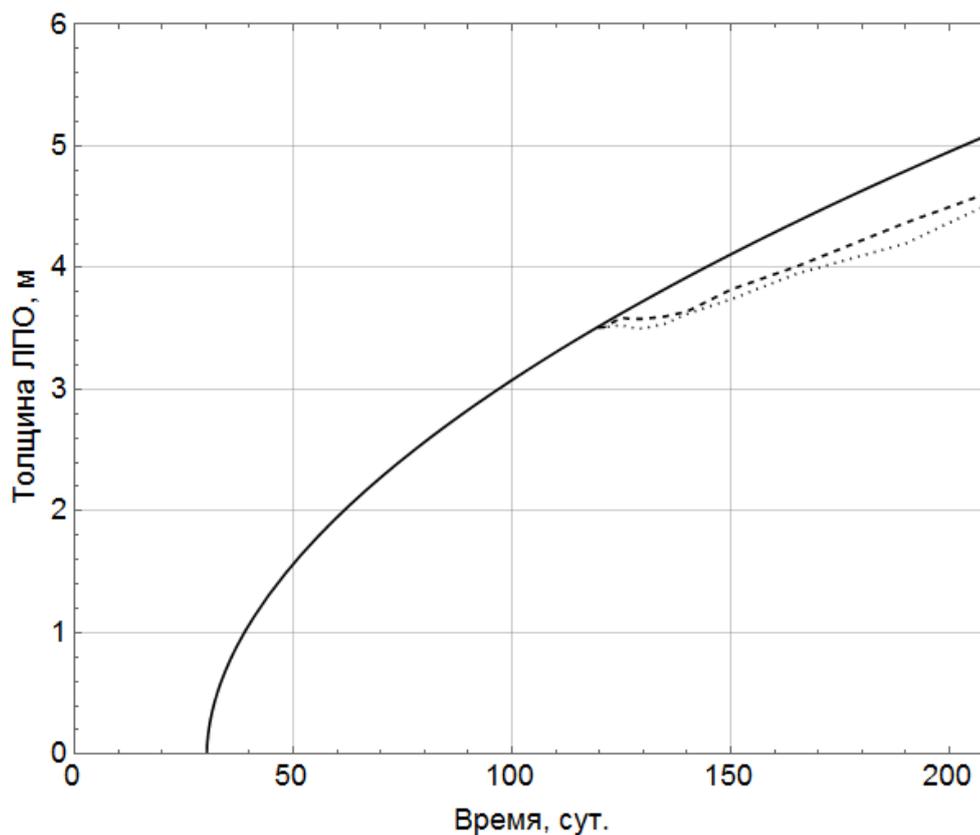


Рисунок 2.12 — Зависимость толщины ЛПО от времени без учета влияния тепловыделения при твердении бетона (сплошная линия) и с учетом влияния тепловыделения при твердении бетона (штриховая линия — результат трехмерного моделирования, пунктирная линия — результат двумерного моделирования без учета слоя затвердевшего бетона)

Различие результатов двумерного и трехмерного моделирования обусловлено тем, что в трехмерном случае диффузия теплоты от гидратации цемента распространяется дополнительно в вертикальном направлении, вследствие чего ледопородное ограждение получает меньше теплоты и замедление роста его толщины менее выражено по сравнению с двумерной моделью.

Таким образом, можно сделать вывод, что тепловыделения при твердении бетонной крепи не сокращают толщину ледопородного ограждения, а лишь замедляют скорость ее роста. Следует отметить, что замедление скорости роста ледопородного ограждения происходит за счет замедления роста его внутренней границы, в то время как никакого влияния на внешнюю границу исследуемый фактор не оказывает.

2.4. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на разработку метода решения обратной задачи Стефана на основе использования дополнительной

информации о закономерностях протекания термодинамических процессов в замораживаемом массиве горных пород, можно сделать следующие выводы:

- представлена математическая постановка прямой и обратной задач Стефана для горизонтального слоя обводненного породного массива с однородными и изотропными теплофизическими свойствами;
- в качестве гипотез принято, что теплообмен в вертикальном направлении пренебрежимо мал по сравнению с теплообменом в горизонтальной плоскости, в начальный момент времени породный массив имеет однородную температуру, а температура на поверхностях замораживающих скважин одинакова для всех колонок и неизменна во времени;
- проведен анализ системы уравнений двухфазной двумерной задачи Стефана в безразмерном виде, на основании анализа определено количество независимых параметров калибровки данной модели;
- разработан численный метод решения обратной задачи Стефана, осуществляющий минимизацию функционала рассогласований между модельными и измеренными температурами в местах расположения контрольных скважин посредством градиентного спуска;
- на основе выполненной калибровки теплофизических свойств слоев горных пород, слагающих замораживаемый породный массив шахтных стволов рудника Талицкого ГОК, отмечается, что откалиброванные значения теплофизических свойств слоев горных пород существенно отличаются от начальных значений, полученных из инженерно-геологических изысканий;
- установлено, что теплообмен горных пород с воздухом и тепловыделения при твердении бетонной крепи не сокращают толщину ледопородного ограждения, а лишь замедляют скорость ее роста.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ СТРОЯЩИХСЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Анализ традиционных и современных способов контроля формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов показывает, что на сегодняшний день отсутствуют технические системы, предназначенные для термометрического контроля за состоянием замораживаемого породного массива. Кроме этого, можно сделать вывод о том, что существующие способы контроля ледопородного ограждения характеризуются следующими недостатками:

- невозможностью непрерывно и оперативно определять фактические параметры ледопородного ограждения на протяжении всего периода строительства шахтных стволов;
- отсутствием методов математического прогнозирования распределения температур во всем объеме участка замораживаемого породного массива.

В связи с этим необходимо на основе интеграции метода решения обратной задачи Стефана, описанного в главе 2, и экспериментальных данных, получаемых при помощи оптоволоконной технологии, разработать систему контроля параметров ледопородного ограждения, устраняющую указанные выше недостатки. Система позволит вывести на качественно новый уровень контроль процессов формирования и состояния ледопородного ограждения, обеспечивая тем самым эффективность строительства шахтных стволов.

Необходимо отметить, что в целях повышения надежности контроля параметров ледопородного ограждения и получения достоверных данных о фактической температуре породного массива в период его активного замораживания должна осуществляться верификация экспериментальных измерений распределенной температуры горных пород в контрольно-термических скважинах, на основании которых производится калибровка расчетных теплофизических параметров математической модели теплообменных процессов, происходящих в обводненном породном массиве. В пассивный период замораживания горных пород предусматривается выполнение верификации результатов математического моделирования, полученных при помощи решения обратной задачи Стефана.

3.1. Экспериментальные измерения распределения температуры горных пород в контрольно-термических скважинах

Основным фактором для оценки параметров ледопородного ограждения является фактическая температура замораживаемых горных пород. Для получения информации о

тепловом состоянии породного массива в различные периоды его замораживания производится бурение контрольно-термических скважин, в которых устанавливаются датчики измерения температуры. В целях обеспечения контакта термодатчиков со стенками контрольной скважины и исключения температурной погрешности скважину заполняют незамерзающей теплопроводящей жидкостью (концентрированным соляным рассолом). На основании периодических измерений температуры в контрольно-термических скважинах, расположенных на различных участках промышленной площадки, определяются фактические параметры ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов [53, 55].

В течение многих лет измерения температуры в контрольных скважинах осуществлялись при помощи отдельных датчиков (термопар, терморезисторов), подвешенных на специальном канате на определенном расстоянии друг от друга. Как правило, замеры производились на уровне кровли и почвы каждого водоносного горизонта [66, 91, 92, 97], на сегодняшний день современный уровень технического развития позволяет производить экспериментальные измерения температуры горных пород по всей глубине термометрической скважины на основе применения оптоволоконной технологии [6, 32, 45, 78, 101, 126]. Кроме того, в отличие от локальных термодатчиков (термопар, терморезисторов) оптический распределенный датчик температуры обладает более длительным сроком службы, даже с учетом влияния агрессивных условий эксплуатации, что делает возможным контролировать динамику температуры горных пород на протяжении всего периода замораживания.

Первоначально, с 1930 г. скважинный мониторинг температуры, основанный на применении оптического волокна, использовался для расчета притоков пластовых флюидов из различных интервалов, оценки профилей приемистости скважин при закачке воды, диагностики эффективности гидроразрыва пласта, определения высоты подъема цементного раствора в затрубном пространстве и выявления межпластовых перетоков [128, 137]. В 1990 г. был разработан способ измерения температуры по всей длине оптического волокна [137], после чего распределенное измерение температуры успешно стало использоваться во многих областях [1, 46, 62, 63, 90, 105, 108, 119]. Наиболее активно оптоволоконная термометрическая технология применяется в нефтегазовой отрасли для оперативного и непрерывного контроля работы параметров эксплуатационной скважины, а также для принятия эффективных решений по увеличению добычи нефти и газа [33, 50, 129].

Метод волоконно-оптического непрерывного мониторинга температуры основан на эффекте Рамана (комбинационное рассеяние) и представлен во многих работах [26,

40, 101, 105, 146]. Принцип измерения температуры заключается в том, что световой сигнал, направленный по оптическому волокну, рассеивается на микроскопически малых колебаниях плотности стеклянных волокон, размер которых меньше длины волны. В отличие от входящего светового сигнала, рассеянный свет подвергается спектральному смещению на величину, равную резонансной частоте колебаний молекулярной решетки (рамановское рассеяние), которое вызвано нагревом кварцевого стекла. Компоненты со смещенной длиной волны образуют в спектре рассеянного света линии-спутники, которые делятся на стоксовы (сдвинуты к большим длинам волн и меньшей частоте) и антистоксовы (сдвинуты к меньшим длинам волн и большей частоте). Интенсивность антистоксовой компоненты зависит от температуры, в то время как стоксова почти не зависит от температуры. Локальная температура в любом месте световода определяется из отношения интенсивностей антистоксового и стоксового света. Благодаря оптическому методу обратного комбинационного рассеяния можно измерять температуру вдоль стеклянного волокна, как функцию места и времени.

В последние годы все чаще оптоволоконная технология измерения распределенной температуры применяется при строительстве шахтных стволов в условиях искусственного замораживания обводненных горных пород. Температуры определяются при помощи оптического сенсорного кабеля, который обладает высокой химической и термической устойчивостью, и монтируется (опускается) в контрольную скважину. Вместо точечных замеров температуры, редко и нерегулярно выполнявшихся электронными приборами, высокочувствительная волоконно-оптическая система распределенного измерения температуры регистрирует данные менее чем с каждого метра длины кабеля через регулярные промежутки времени. В результате теплового воздействия замораживающих колонок на породный массив, с учетом различия физических свойств слагающих его горных пород, в контрольной скважине регистрируются температуры, вызванные внутримолекулярными колебаниями решетки оптического волокна. Благодаря обработке и интерпретации обратного комбинационного рассеяния температура вдоль оптического волокна может быть установлена с пространственным разрешением 25 сантиметров и с точностью измерения 0,1 °С. При этом период измерения распределенной температуры в контрольных скважинах составляет всего несколько минут. На сегодняшний день главными мировыми производителями распределенных датчиков температуры являются Silixa Ltd (Великобритания), Lios Sensing (Германия), GESO GmbH (Германия), Fiberpro (Корея), Luna Innovations (США). Одним из лидеров отрасли волоконно-оптических

систем мониторинга в России, выпускающих измерительное оборудование, является ООО «Инверсия-Сенсор».

Схема конструкции контрольно-термической скважины, включающая размещенный на всю глубину скважины оптоволоконный кабель, а также динамика экспериментальных измерений распределенной температуры замораживаемых горных пород представлены на рисунке 3.1.

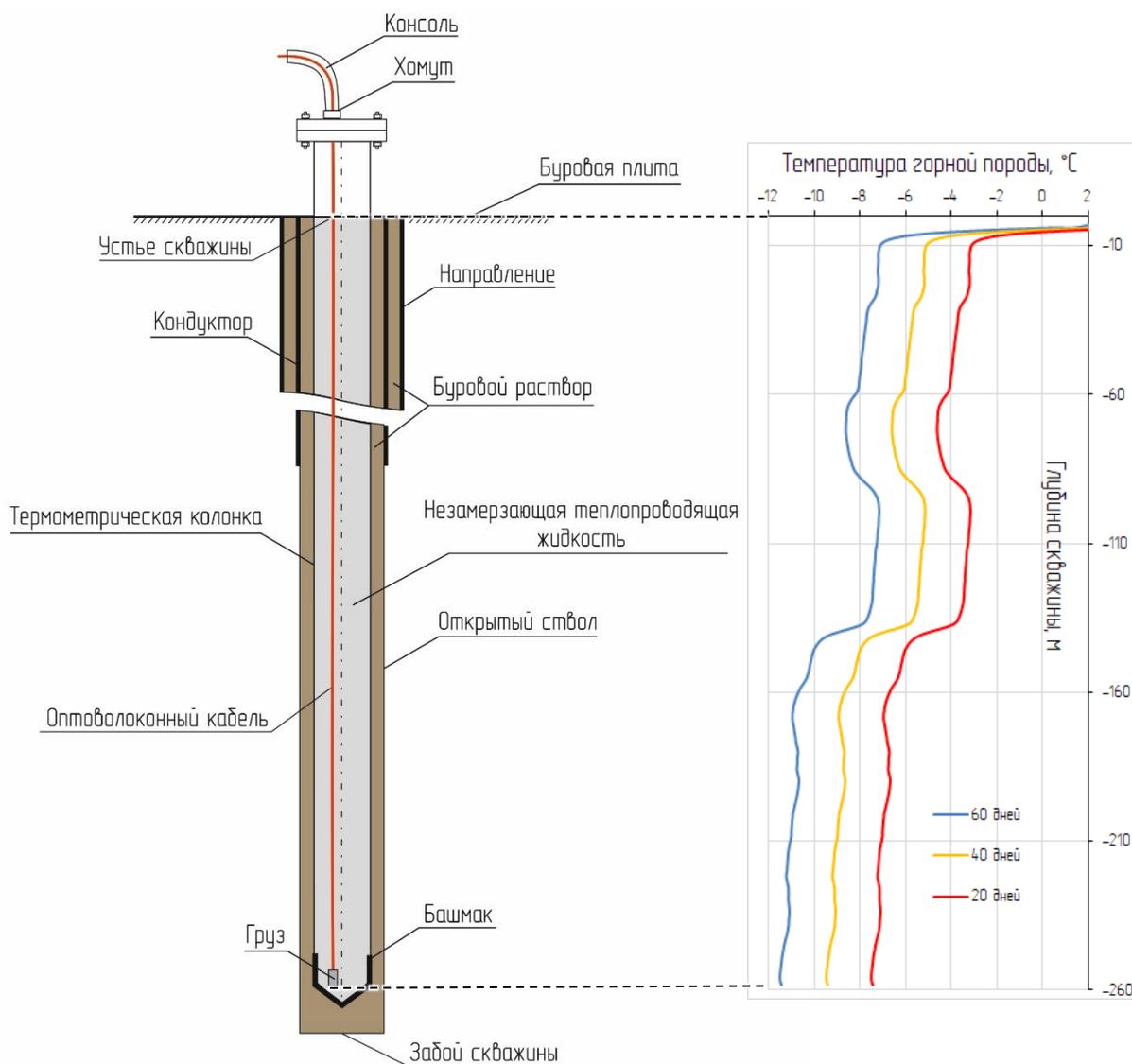


Рисунок 3.1 — Схема конструкции контрольно-термической скважины и динамика распределенной температуры горной породы

Следует отметить, что измерительные датчики, а также оборудование для регистрации и обработки данных термометрии скважин являются важными элементами при строительстве шахтных стволов способом искусственного замораживания горных пород. Только точное и надежное измерительное оборудование гарантирует достоверный расчет температурного поля, на основании которого производится прогноз параметров состояния ледопородного ограждения в периоды его формирования,

поддержания и оттаивания. Кроме того, информация о фактической температуре замораживаемых горных пород позволяет принимать рациональные технические решения о необходимости корректировки параметров работы холодильных установок.

В результате, на базе применения технологии оптоволоконной термометрии в контрольно-термических скважинах, расположенных на участке строительства шахтных стволов, определяется временная и пространственная динамика изменения распределенной температуры горных пород, слагающих породный массив. При этом с учетом непрерывной обработки и интерпретации экспериментальных измерений температуры горных пород в ограниченном количестве контрольных скважин, целесообразно выполнить их интеграцию с разработанным методом решения коэффициентной обратной задачи Стефана.

3.2. Верификация показаний оптоволоконной системы термометрического мониторинга

Верификация данных, получаемых при помощи оптоволоконной системы, о распределенной температуре горных пород по глубине контрольно-термических скважин выполняется посредством дополнительных экспериментальных измерений температуры локальным высокоточным термодатчиком. Контрольные замеры температуры горных пород на определенных глубинах скважины сопоставляются с показаниями оптической аппаратуры.

Результаты верификации измерений температуры горных пород оптоволоконной системой на Скиповом и Клетевом стволах рудника Нежинского ГОК ИООО «Славкалий» приведены в таблицах 3.1, 3.2.

Таблица 3.1 — Результаты верификации показаний оптоволоконной системы термометрического контроля ледопородного ограждения Скипового ствола № 1

Глубина измерения, м	Время измерения датчиком, ч	Показания локального датчика, °С	Время измерения оптикой, ч	Показания оптики, °С	Расхождение, °С
Контрольно-термическая скважина № 1 (КТ-1)					
20	17:23	-6,33	17:00	-5,55	-0,78
100	17:58	-1,62	18:00	-1,54	-0,08
136	18:17	-6,68	18:00	-6,25	-0,43
Контрольно-термическая скважина № 2 (КТ-2)					
20	9:00	1,32	9:00	2,46	-1,14
40	9:20	1,49	9:00	2,63	-1,14
48	9:41	1,54	10:00	3,12	-1,58
56	9:59	1,07	10:00	2,93	-1,86
64	10:20	2,21	10:00	3,17	-0,96
72	10:46	2,09	11:00	3,93	-1,84
82	11:03	2,75	11:00	3,63	-0,88
100	11:22	5,15	11:00	6,00	-0,85
113	11:43	4,34	12:00	6,10	-1,76
136	12:03	3,66	12:00	3,89	-0,23
Контрольно-термическая скважина № 3 (КТ-3)					
20	12:35	2,44	13:00	3,15	-0,71
40	12:55	2,73	13:00	3,62	-0,89
48	13:13	2,64	13:00	3,88	-1,24
56	13:30	3,02	13:00	3,86	-0,84
64	13:49	3,96	14:00	4,36	-0,40
72	14:06	3,66	14:00	4,76	-1,10
82	14:28	4,30	14:00	4,87	-0,57
100	15:04	6,32	15:00	6,95	-0,63
113	15:22	5,57	15:00	7,16	-1,59
136	15:45	4,55	16:00	4,69	-0,14
Контрольно-термическая скважина № 4 (КТ-4)					
20	16:15	-16,20	16:00	-14,92	-1,28
100	16:40	-18,68	17:00	-16,99	-1,69
118	17:02	-20,66	17:00	-19,59	-1,07

На основании сравнительного анализа данных, приведенных в таблице 3.1, можно сделать вывод, что оптоволоконная аппаратура на момент проведения верификации преимущественно завывшала значения температуры горных пород по всей глубине замораживания. При этом корректировка расчетных параметров модели на основании завывшенных данных, получаемых с оптоволоконного распределенного датчика, позволяет предусмотреть технический запас при определении фактических размеров ледопородного ограждения. Наибольшее расхождение значений температур горной породы в абсолютном выражении равно 1,86 °С и наблюдается в контрольно-термической скважине № 2 на глубине залегания 56 метров — зачастую это связано с погрешностью расположения локального датчика на необходимой глубине. Среднее

расхождение температур в контрольных скважинах Скипового ствола № 1 составляет — 0,99 °С, что на практике является допустимым.

Таблица 3.2 — Результаты верификации показаний оптоволоконной системы термометрического контроля ледопородного ограждения Клетевого ствола № 2

Глубина измерения, м	Время измерения датчиком, ч	Показания локального датчика, °С	Время измерения оптикой, ч	Показания оптики, °С	Расхождение, °С
Контрольно-термическая скважина № 1 (КТ-1)					
20	18:08	-6,83	18:00	-5,75	-1,08
100	18:31	-1,34	19:00	-0,56	-0,78
134	18:51	-8,78	19:00	-7,82	-0,96
Контрольно-термическая скважина № 2 (КТ-2)					
20	14:02	-1,16	14:00	-1,1	-0,06
43	14:38	-0,46	15:00	-0,72	0,26
47	14:49	-1,18	15:00	-0,55	-0,63
54	15:17	-2,96	15:00	-2,71	-0,25
63	15:36	-0,48	16:00	-1,56	1,08
72	15:53	-1,59	16:00	-0,92	-0,67
82	16:11	-0,47	16:00	-1,11	0,64
100	16:28	1,6	16:00	1,53	0,07
114	16:45	0,71	17:00	1,81	-1,10
122	17:01	-3,40	17:00	-2,02	-1,38
134	17:25	-4,07	17:00	-4,37	0,30
Контрольно-термическая скважина № 3 (КТ-3)					
20	10:18	2,60	10:00	3,85	-1,25
43	10:34	3,05	11:00	4,19	-1,14
47	10:52	3,39	11:00	4,64	-1,25
54	11:11	2,11	11:00	3,49	-1,38
63	11:30	3,43	11:00	4,13	-0,70
72	11:48	2,95	12:00	4,65	-1,70
82	12:07	3,92	12:00	4,91	-0,99
100	12:26	5,83	12:00	6,96	-1,13
114	12:45	5,37	13:00	7,15	-1,78
122	13:03	3,42	13:00	5,04	-1,62
134	13:20	2,82	13:00	3,95	-1,13
Контрольно-термическая скважина № 4 (КТ-4)					
20	19:19	-15,96	19:00	-14,83	-1,13
100	19:40	-13,78	20:00	-12,93	-0,85
134	20:00	-18,05	20:00	-16,99	-1,06

Из приведенного анализа в таблице 3.2 следует, что оптоволоконная аппаратура также преимущественно завышала значения температуры горных пород по всей глубине замораживания. Наибольшее расхождение значений температур горной породы в абсолютном выражении равно 1,78 °С и наблюдается в контрольно-термической скважине № 3 на глубине залегания породы 114 метров. Среднее расхождение температур в контрольно-термических скважинах Клетевого ствола № 2 составляет - 0,77 °С, что на практике является допустимым.

Следует отметить, что при значительных отклонениях значений температур, измеряемых оптическим распределенным и локальным датчиками, производится настройка оптоволоконной системы в соответствии с рекомендациями производителя волоконно-оптического регистратора (интеррогатора).

3.3. Интеграция метода решения обратной задачи Стефана с экспериментальными измерениями температуры горных пород

Применение технологии оптоволоконной термометрии позволяет в любой момент времени получать распределение температуры горных пород по глубине контрольных скважин, расположенных на промышленной площадке шахтных стволов. Для надежного и точного прогнозирования распределения температуры во всем породном массиве решаются прямая и обратная задачи Стефана, которые подробно описаны в главе 2.

Прямая задача Стефана решается на основе проектной и технической документации организации строительства шахтных стволов, содержащей геологические и теплофизические исходные данные о породном массиве, а также результаты отклонения замораживающих скважин от их заданного положения, кроме этого используются фактические параметры работы замораживающих станций шахтных стволов. В общем виде решение прямой задачи сводится к решению алгебраических уравнений теплопроводности в энтальпийной постановке (2.1) — (2.6).

При решении обратной задачи Стефана дополнительно используются непрерывные и оперативные экспериментальные измерения распределенной температуры горных пород, получаемые при помощи оптоволоконной термометрии контрольных скважин. За счет дополнительных сведений о распространении теплоты в породном массиве решение обратной задачи Стефана уточняет решение прямой задачи Стефана.

Метод решения обратной задачи Стефана сводится к минимизации функционала рассогласований между модельными и измеренными температурами в скважинах с использованием метода градиентного спуска (2.29). Минимизация функционала осуществляется по физическим свойствам породного массива.

Благодаря интеграции разработанного метода решения обратной задачи Стефана и данных термометрии контрольно-термических скважин значительно повышается качество прогноза состояния ледопородного ограждения, что, в конечном счете, приводит к принятию целесообразных технических решений в целях повышения

безопасности ведения горных работ, а также эффективности строительства шахтных стволов в целом.

3.4. Концепция автоматизированной системы контроля формирования и состояния ледопородного ограждения на основе оптоволоконной технологии

На основе интеграции обратной задачи Стефана с экспериментальными измерениями температуры горных пород разработана концепция автоматизированной системы термометрического контроля формирования и состояния ледопородного ограждения с использованием расчетной модели термодинамических процессов, происходящих в обводненном породном массиве в условиях его искусственного замораживания [58, 72, 73].

Система контроля состоит из следующих структурных элементов:

- оптоволоконный измерительный кабель, проложенный в контрольно-термических скважинах и термометрических шпурах;
- волоконно-оптический регистратор (интеррогатор), сканирующий оптические линии и преобразующий излучение обратного рассеяния по длине световода в температуру;
- база данных для хранения динамики температуры горных пород и параметров работы замораживающей станции шахтных стволов;
- автоматизированное рабочее место специалиста с моделью термодинамических процессов, происходящих в породном массиве.

Схема взаимодействия всех структурных элементов автоматизированной системы контроля ледопородных ограждений представлена на рисунке 3.2.

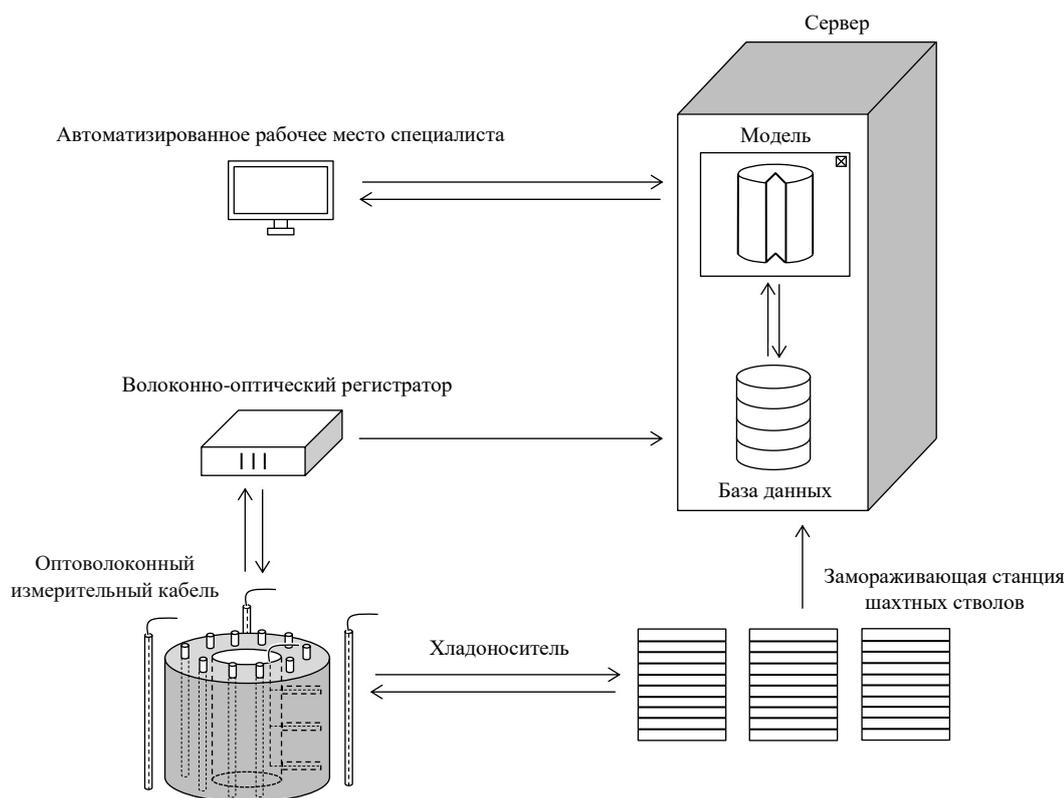


Рисунок 3.2 — Схема взаимодействия структурных элементов автоматизированной системы контроля ледопородных ограждений

Особенность системы термометрического мониторинга ледопородного ограждения заключается в том, что ее структурные элементы позволяют:

- хранить все данные геологических и теплофизических свойств горных пород, полученных в результате проведения инженерно-геологических изысканий на участке строительства шахтных стволов;
- осуществлять сбор и хранение параметров работы замораживающей станции шахтных стволов, таких как температура прямого и обратного потоков холодоносителя, циркулирующего в замораживающих скважинах, его расход, холодильная мощность оборудования и другие;
- интерпретировать результаты термометрии контрольных скважин в процессе активного периода замораживания горных пород на базе оптоволоконной технологии с точностью измерения температуры от $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пространственным разрешением 25 см, а также результаты термометрии шпуров в процессе оттаивания горных пород с точностью — от $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пространственным разрешением 5 см;

- прогнозировать температурное поле во всем замораживаемом объеме горных пород в различные моменты времени с учетом уточненных расчетных теплофизических параметров математической модели.

В результате данные о внутримолекулярных колебаниях решетки оптоволоконного кабеля, расположенного в контрольной скважине, либо в термометрическом шпуре на всю их глубину, вызванные тепловым воздействием в результате искусственного замораживания породного массива, обрабатываются и интерпретируются при помощи волоконно-оптического регистратора, который осуществляет сравнение спектров и интенсивности исходного лазерного излучения и излучения, рассеянного в обратном направлении (Рамановское рассеяние), определяя таким образом температуру горных пород вдоль оптического волокна. Эти данные вместе с данными о параметрах работы замораживающего комплекса передаются на автоматизированное рабочее место специалиста, где считываются при помощи специализированного программного обеспечения, подробно представленного в разделе 5.3. В дальнейшем с использованием математической модели термодинамических процессов, происходящих в обводненном породном массиве, производится расчет теплового поля во всем объеме массива горных пород и визуализация результатов расчета. При этом разработка модели осуществляется с необходимой детальностью на основании проекта организации строительства шахтных стволов и данных инженерно-геологических изысканий.

Следует отметить, что данные термометрии шпуров, пробуренных в стенках шахтного ствола в целях контроля температуры затюбингового пространства в процессе возведения его крепи, используются только для проверки корректности модельных расчетов.

Алгоритм работы автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений представлен на рисунке 3.3.

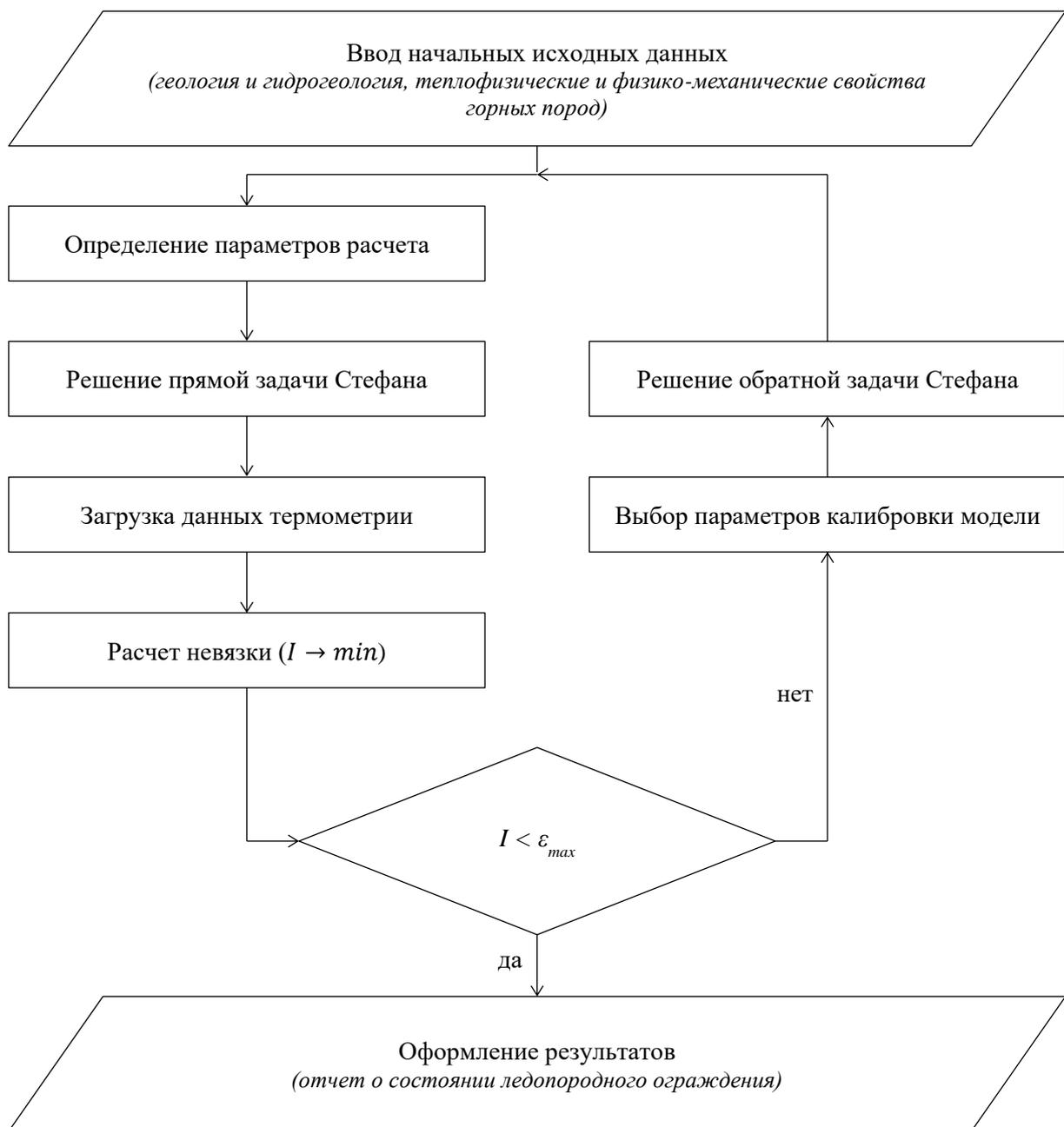


Рисунок 3.3 — Алгоритм работы автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений

Алгоритм работы системы контроля позволяет определять невязку модельных и фактических значений температуры замораживаемых горных пород в целях последующей ее минимизации посредством метода решения обратной задачи Стефана. Метод решения обратной задачи на основе применения экспериментальных данных подробно описан в главе 2.

3.5. Верификация математической модели на основе данных инструментальных измерений

Верификация результатов математического прогнозирования параметров состояния ледопородного ограждения, полученных при помощи метода решения обратной задачи Стефана, осуществляется при помощи натуральных измерений температуры породы в шахтном стволе в процессе ведения горных работ. Данные натуральных измерений, выполненных 12.07.2018 г. в одном из исследуемых слоев горной породы (песок) Скипового ствола № 1 рудника Нежинского ГОК ИООО «Славкалий», представлены ниже.

Замеры температуры горной породы производились инфракрасным термометром FLUKE 568 и локальным контактным датчиком (термопара). Значения температуры песка на стенках шахтного ствола находились в пределах от $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, спустя незначительный промежуток времени (не более 1 минуты) после отбойки температура песка поднималась до $+2\text{ }^{\circ}\text{C} \div +4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отмечается, что температура воздуха в стволе, измеренная термовлагомером FLUKE 971, составляла $+24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 62 %, температура поверхности призабойной опалубки равнялась $+29\text{ }^{\circ}\text{C} \div +30\text{ }^{\circ}\text{C}$, отметка забоя шахтного ствола — $-20,2\text{ м}$.

Локальные измерения температуры горной породы подтверждаются результатами тепловизионной съемки, выполненной при помощи тепловизора FLIR 660. Тепловизионные снимки приведены на рисунках 3.4, 3.5.

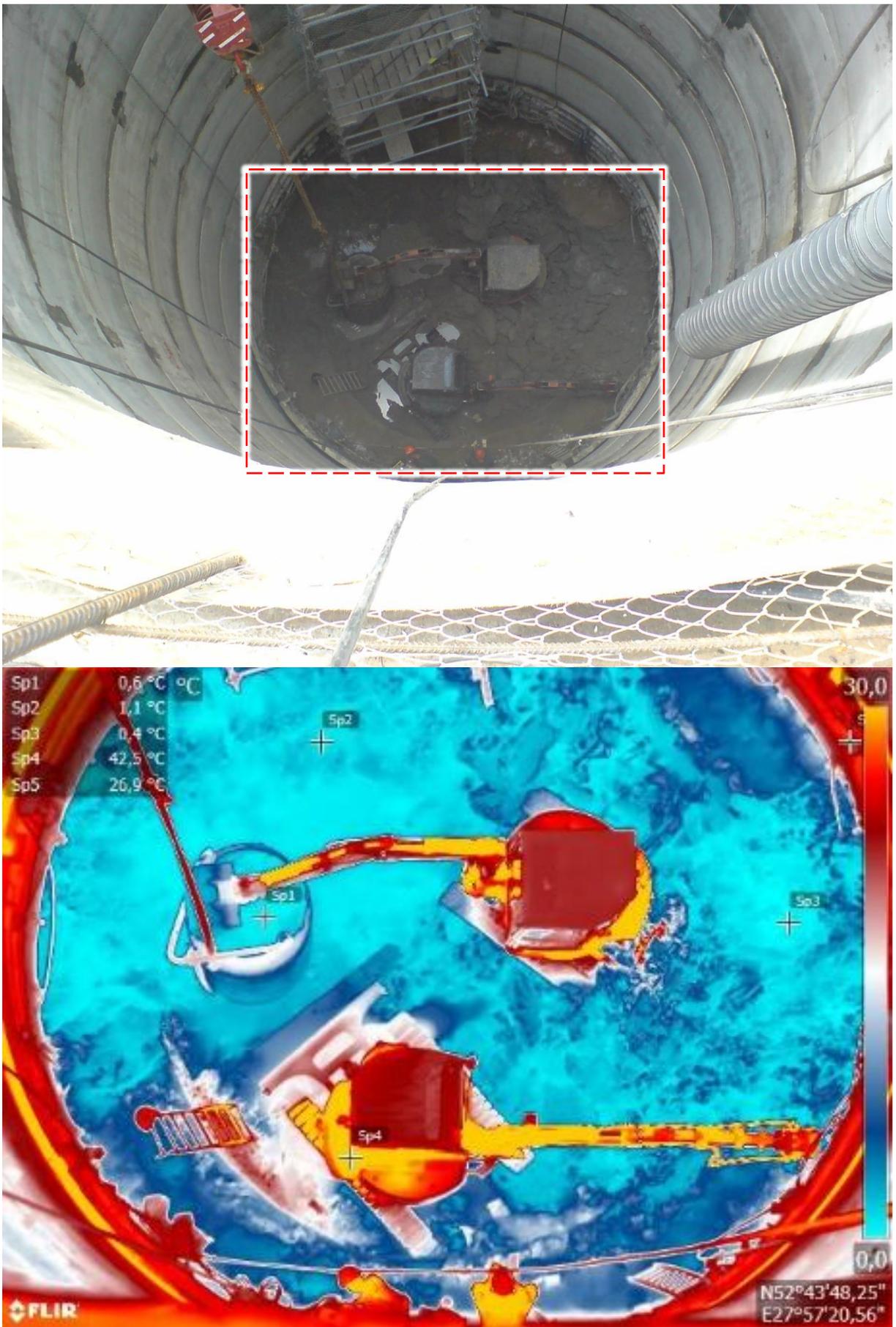


Рисунок 3.4 — Фото- и тепловизионный снимки забоя Скипового ствола № 1 Нежинского ГОК — вид сверху с буровой плиты ствола



Рисунок 3.5 — Фото- и тепловизионный снимки южной части стенки Скипового ствола № 1 Нежинского ГОК — вид с отметки забоя (-20,2 м) ствола

Из рисунков 3.4, 3.5 видно, что температуры в прицельных точках на инфракрасных изображениях совпадают с замерами локального датчика.

На рисунке 3.6 представлено модельное температурное поле на момент проведения натурных измерений (12.07.2018 г.) в исследуемом слое песка, через который осуществлялась проходка Скипового ствола № 1 рудника Нежинского ГОК.

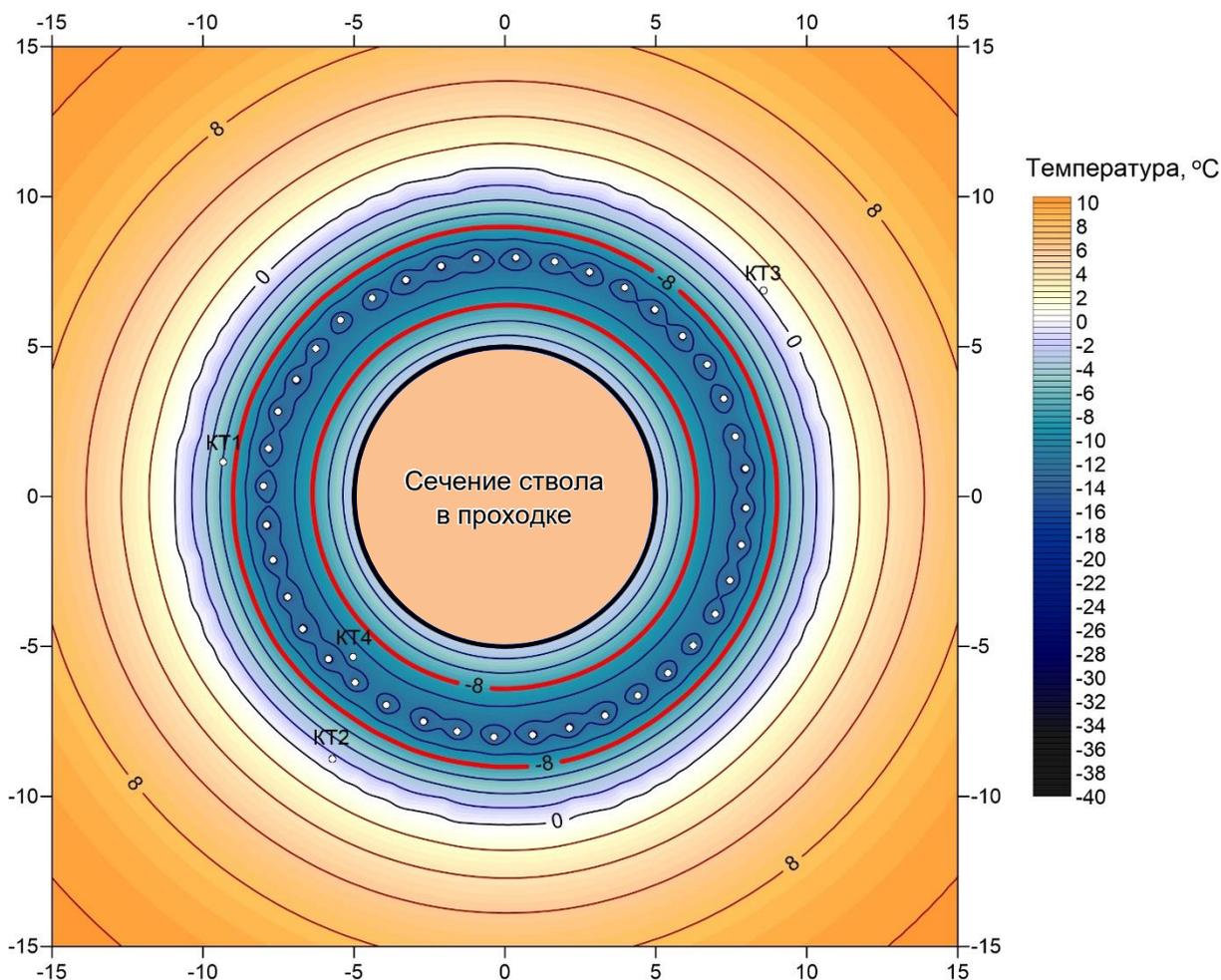


Рисунок 3.6 — Модельное распределение температуры в слое песка на отметке -20,2 м, рассчитанное на 12.07.2018 г.

Анализ результатов показывает, что натурные замеры температуры песка в стволе № 1 полностью соответствуют модельному температурному полю, рассчитанному для соответствующего слоя горной породы на момент их выполнения. Это свидетельствует об адекватности применяемой для расчетов теплофизической модели реальным условиям.

3.6. Выполнение контроля формирования и состояния ледопородного ограждения

В процессе выполнения контроля за формированием и состоянием ледопородных ограждений вокруг строящихся шахтных стволов горно-обогатительных комплексов, на

которых внедрена и адаптирована автоматизированная система мониторинга, с учетом интеграции экспериментальных данных и метода решения обратной задачи Стефана, ежесуточно:

1. отслеживается и пополняется фактический график замораживания горных пород, включающий в себя температуры прямого и обратного потоков хладоносителя, циркулирующего в замораживающих колонках, а также его расход;
2. строятся графики временной и пространственной динамики изменения температуры горных пород в термометрических скважинах шахтных стволов;
3. осуществляется прогноз и визуализация теплораспределения как в исследуемых слоях горных пород, так и по глубине замораживания породного массива;
4. рассчитываются фактические толщины ледопородного ограждения для каждого исследуемого слоя замораживаемого массива горных пород.

Результаты, получаемые в ходе осуществления мониторинга за состоянием ледопородного ограждения, ежедневно формируются в виде отчета в формате Adobe Acrobat Document (.pdf) и направляются специалистам строящегося горно-обогатительного комплекса.

На рисунке 3.7 представлен пример фактических параметров замораживания горных пород. Из рисунка видно, что график замораживания изменяется в значительных пределах, оказывая, таким образом, существенное влияние на параметры ледопородного ограждения.

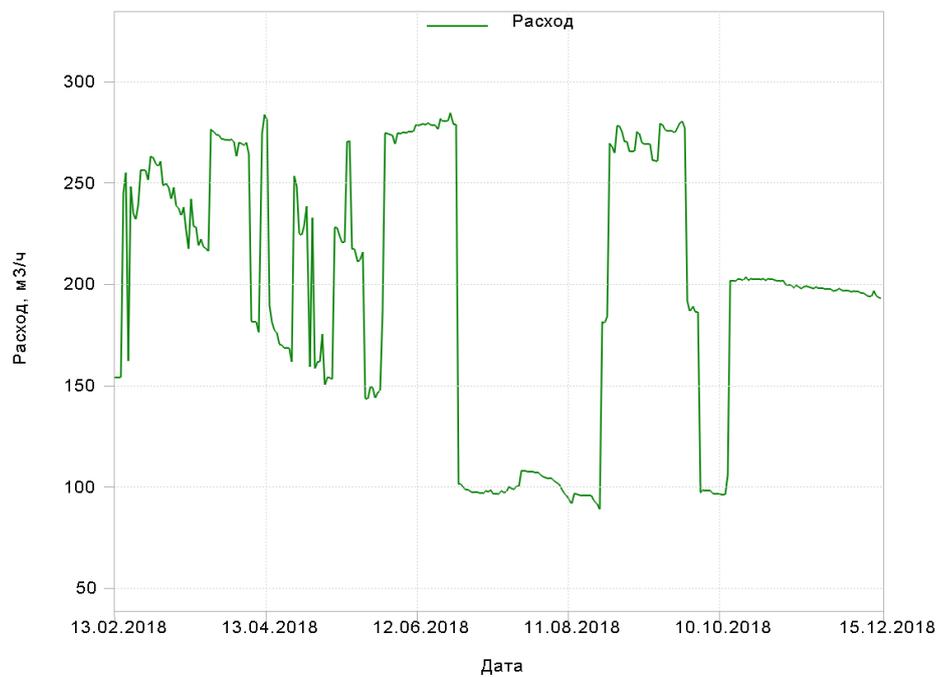
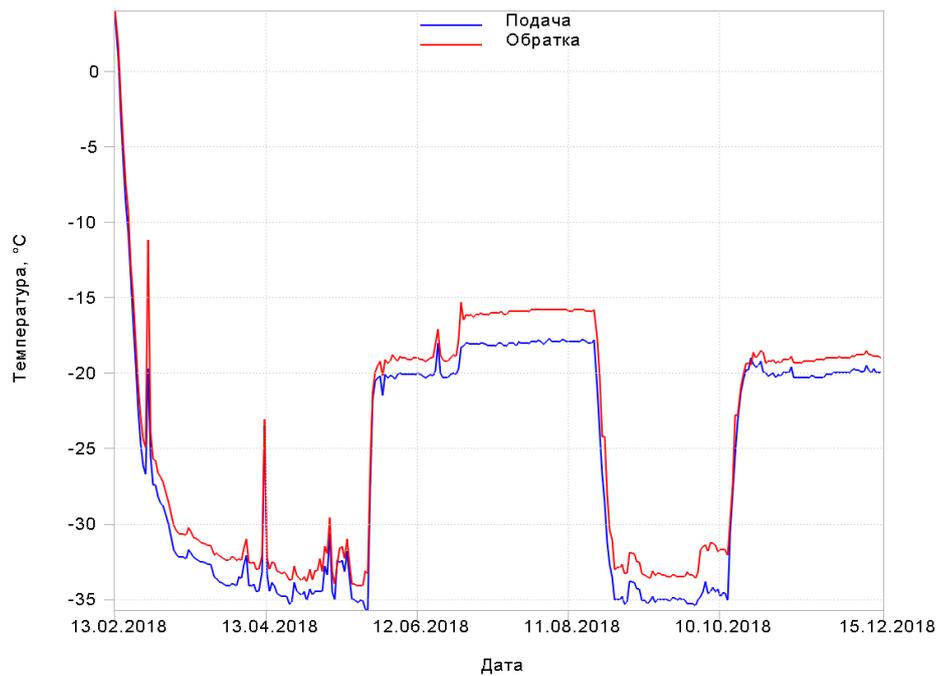


Рисунок 3.7 — Пример фактического графика замораживания горных пород

На рисунке 3.8 приведен пример динамики экспериментальных измерений распределенной температуры горных пород в контрольно-термической скважине строящегося шахтного ствола.

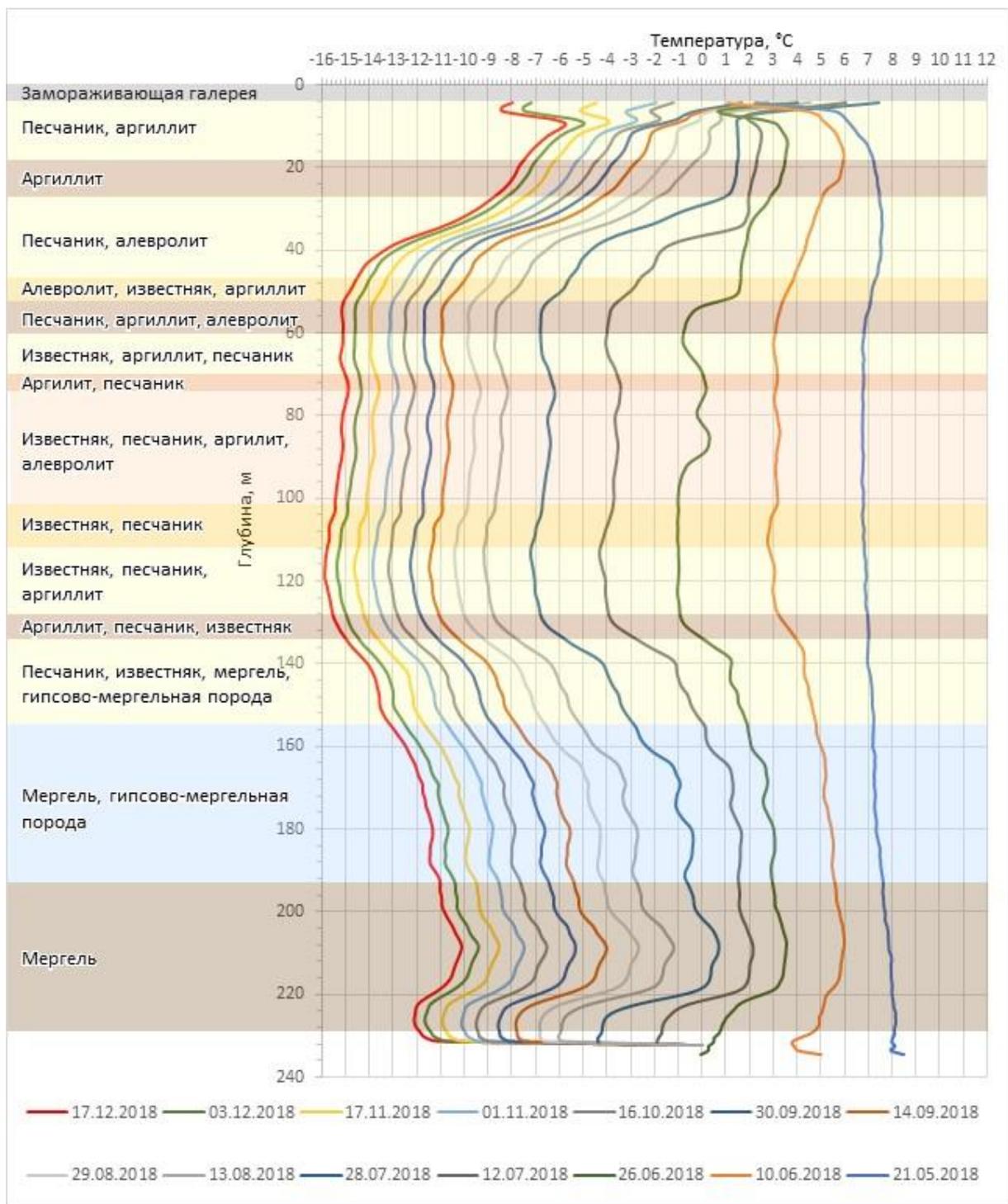


Рисунок 3.8 — Пример динамики экспериментальных измерений распределенной температуры горных пород в контрольно-термической скважине

На рисунке 3.9 представлен пример распределения температуры в различных исследуемых слоях горных пород, слагающих замораживаемый породный массив. При этом на рисунке 3.9а тепловое поле рассчитано с учетом наличия шахтного ствола в слое проходимой горной породы, что привело к влиянию технологических факторов на распределение в нем температуры, а на рисунке 3.9б отображено тепловое поле слоя породы без учета ведения в нем горных работ.

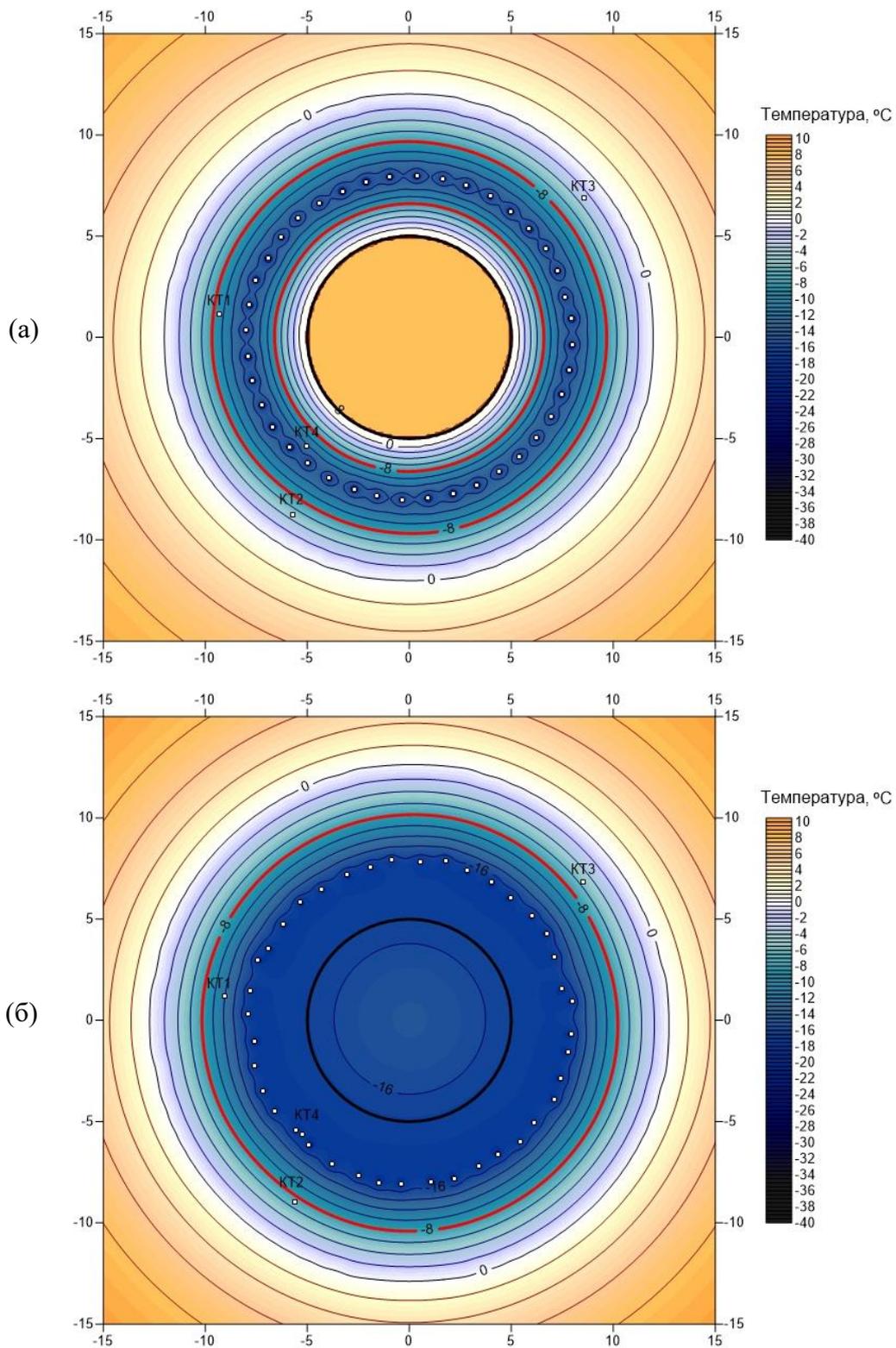


Рисунок 3.9 — Примеры распределения температуры в различных исследуемых слоях горных пород:
а — с учетом наличия шахтного ствола, б — без ствола

На рисунке 3.10 представлен пример распределения температуры по глубине замораживаемого породного массива.

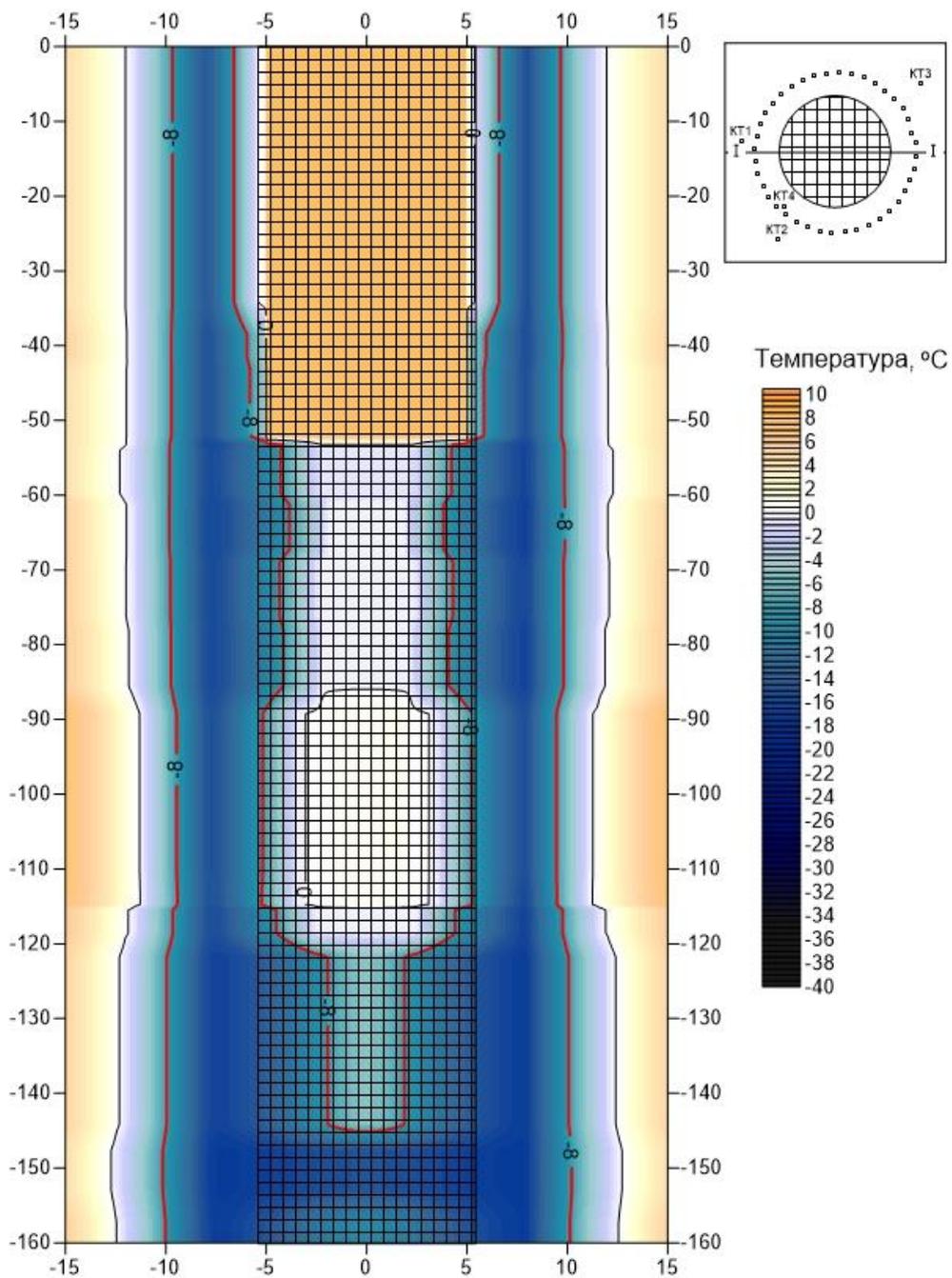


Рисунок 3.10 — Пример распределения температуры по глубине замораживания

На рисунке 3.11 представлен пример распределения температуры в затюбинговом пространстве шахтного ствола. Измерения температуры производились в контрольных шпурах, которые пробурены в стенках ствола на определенных глубинах.

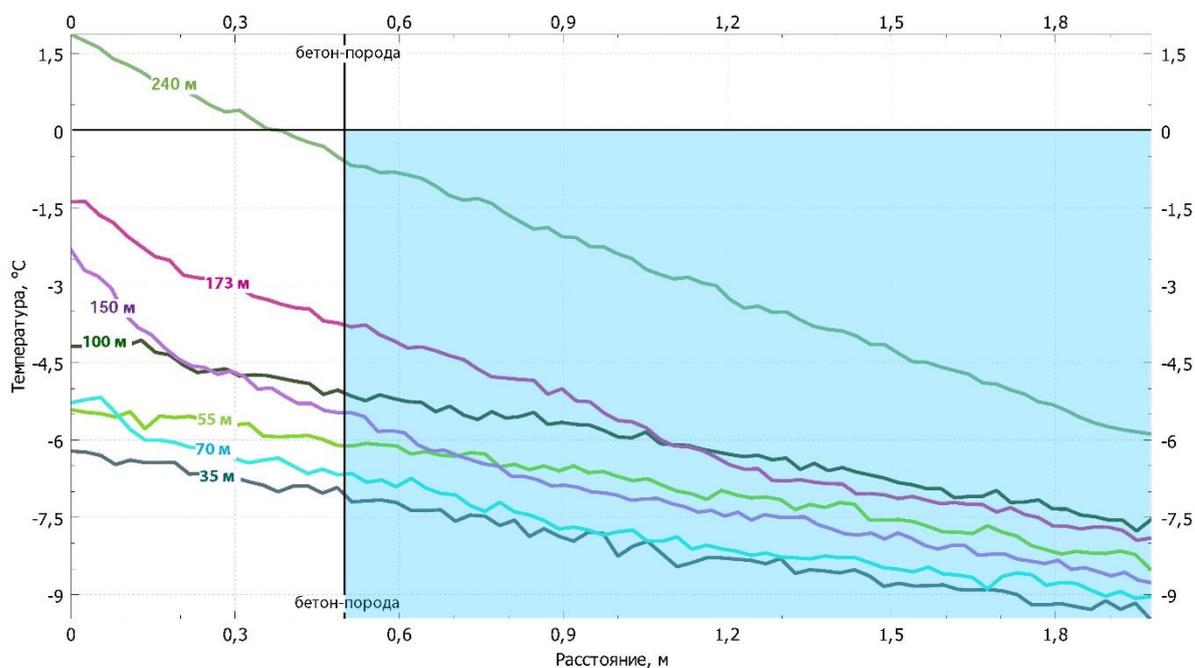


Рисунок 3.11 — Примеры распределения температуры в горизонтальных шпурах, пробуренных на отметках -35 м, -55 м, -70 м, -100 м, -150 м, -173 м, -240 м

На основании решения задачи Стефана рассчитываются толщины ледопородного ограждения в исследуемых литологических слоях замораживаемого породного массива. Необходимо отметить, что фактическая толщина ледопородного ограждения определяется на основании рассчитанных температурных полей как наименьшее расстояние между двумя изотермами одного значения по разные стороны контура замораживающих скважин, соответствующих температуре прочного ледопородного ограждения в соответствии с проектом замораживания горных пород. При этом фактическая толщина имеет ненулевое значение, только если ледопородное ограждение достигло сплошности, то есть, изотермы с требуемым значением температуры сомкнулись по всему контуру замораживающих скважин.

Пример расчетных толщин ледопородного ограждения на конкретные даты для шахтного ствола приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Пример расчетных значений толщин ледопородного ограждения для исследуемых слоев замораживаемого породного массива

№	Исследуемый литологический слой	Глубина, м	Расчетная толщина ЛПО* на 09.04.2018 г., м	Расчетная толщина ЛПО* на 10.04.2018 г., м	Требуемая толщина ЛПО, м
1	Песок	19,0	2,48	2,52	0,47
2	Глина	40,0	2,09	2,12	0,47
3	Песок	47,7	1,96	2,04	1,06
4	Песок глинистый	56,9	2,05	2,08	1,06
5	Глина алевритистая	64,3	2,04	2,07	0,83
6	Песок	72,6	1,87	1,94	1,50
7	Алеврит	81,8	2,02	2,05	1,39
8	Мел	99,8	1,54	1,61	0,89
9	Песчаник	114,0	1,72	1,75	1,92
10	Песок	117,0	2,10	2,14	1,80
11	Глина	133,0	2,31	2,34	3,79
12	Песок	150,3	2,81	2,85	2,27
13	Глина аргиллитоподобная	155,0	2,27	2,30	1,10

* — толщина ледопородного ограждения в исследуемых слоях определена для температуры замороженных горных пород -8°C

Таким образом, на основе анализа полученных результатов термометрического мониторинга ежесуточно производится сопоставление проектной и фактической толщин ледопородного ограждения. В таблице 3.3 красным цветом выделены слои, в которых расчетная толщина ледопородного ограждения не достигла проектной.

Основным результатом контроля формирования и состояния ледопородного ограждения является заключение о достижении им сплошности и толщины проектных параметров по всей глубине замораживания. Подготовленное заключение служит основанием для принятия решения о начале проходки шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. Кроме того, на основании термометрического контроля в процессе проходки шахтных стволов производится корректировка параметров работы

холодильного оборудования замораживающей станции шахтных стволов в целях обеспечения безопасности ведения горных работ и повышения технико-экономических показателей строительства в целом [52].

В результате, разработанная автоматизированная система термометрического мониторинга позволяет вывести на качественно новый уровень контроль процессов формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

3.7. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на разработку автоматизированной системы термометрического контроля состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов, можно сделать следующие выводы:

- интеграция экспериментальных измерений распределенной температуры горных пород в контрольно-термических скважинах с методом решения обратной задачи Стефана позволяет разработать систему контроля формирования и состояния ледопородного ограждения, отличительной особенностью которой является прогнозирование температурного поля во всем объеме участка породного массива в течение всего периода его замораживания и оттаивания;
- верифицированы показания оптоволоконной системы термометрического контроля и результаты математического моделирования термодинамических процессов, происходящих в условиях замораживаемого породного массива, на основании которых рассчитываются фактические параметры ледопородного ограждения;
- использование автоматизированной системы термометрического контроля позволяет вывести на качественно новый уровень контроль процессов формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях с учетом определения и визуализации распределения температуры во всем замораживаемом массиве горных пород.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

К технологическим параметрам способа термометрического контроля процессов искусственного замораживания и оттаивания обводненного породного массива относятся количество и расположение контрольно-термических скважин на промышленной площадке строящихся шахтных стволов, а также пространственное разрешение измерений температуры горных пород по глубине замораживания.

Точность и надежность определения фактического состояния ледопородного ограждения непосредственно зависит от рационального выбора технологических параметров термометрического контроля еще до начала процесса замораживания горных пород. Для получения наиболее достоверных и полных данных о температуре замораживаемых горных пород, с учетом ограниченной информации, получаемой при помощи контрольно-термических скважин, в данной главе проводится исследование и обоснование оптимальных технологических параметров.

Первоначально выполняется статистическая обработка экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольных скважинах строящихся шахтных стволов, относящихся к различным промышленным объектам. На основании обработки и анализа устанавливаются закономерности влияния процесса искусственного замораживания на локальные участки породного массива. В дальнейшем проводится исследование влияния расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана, позволяющей рассчитывать температурное поле во всем объеме замораживаемого породного массива. Кроме этого, определяется минимально требуемое количество контрольно-термических скважин, обеспечивающее всесторонний контроль состояния ледопородного ограждения с учетом выхода из строя замораживающих колонок в процессе активного замораживания горных пород.

В итоге по результатам статистической обработки и выполненных исследований производится обоснование оптимального расположения и количества контрольно-термических скважин, сооружаемых на участке строительства шахтных стволов способом замораживания породного массива. Также осуществляется обоснование необходимого пространственного разрешения измерений распределенной температуры по глубине термометрической скважины.

4.1. Экспериментальные исследования теплового поля породного массива в условиях его искусственного замораживания

Оптимальное расположение ограниченного количества термометрических скважин на участке строящихся шахтных стволов должно обеспечивать получение достоверной информации о распределении температуры в обводненном породном массиве в процессе его искусственного замораживания. Представление о теплораспределении в породном массиве на основе данных термометрии позволяет судить о параметрах состояния ледопородного ограждения.

Данные по экспериментальным исследованиям температурных полей замораживаемых массивов горных пород получены и накоплены в рамках выполнения научно-исследовательских работ «ГИ УрО РАН». Исследования основаны на измерениях температуры горных пород в контрольно-термических скважинах в процессе их искусственного замораживания, которые производятся при помощи оптоволоконной технологии и подробно описаны в разделе 3.1.

В целях установления закономерностей влияния процесса искусственного замораживания на локальные участки породного массива выполнен анализ экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах, расположенных на разных расстояниях от контура замораживающих скважин. Для каждого горно-обогатительного комплекса, где производился термометрический контроль (глава 3), выбран один исследуемый слой породного массива с наибольшей рассчитанной в проекте толщиной ледопородного ограждения по всей глубине замораживания. Параметры исследуемых слоев различных замораживаемых участков массива горных пород приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 — Параметры исследуемых слоев породного массива

Горно-обогатительный комплекс	Слой	Интервал залегания, м	Температуропроводность, м ² /с		Влагосодержание, кг/кг	Проектная толщина ЛПО, м*
			a_{sd}	a_{lq}		
Нежинский	Глина	119÷147	$8,38 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	0,36	3,79
Петриковский	Песчаник	136÷146	$8,14 \cdot 10^{-7}$	$1,47 \cdot 10^{-6}$	0,17	2,50
Талицкий	Мергель	159÷187	$9,52 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$	0,13	6,34

* — проектная толщина ледопородного ограждения в исследуемых слоях глины и песчаника рассчитана для температуры замороженной горной породы $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в слое мергеля для температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Расположение замораживающих и контрольно-термических скважин, проходящих через исследуемые слои горных пород, с учетом их отклонения от проектного положения в интервале залегания слоя, представлено на рисунке 4.1.

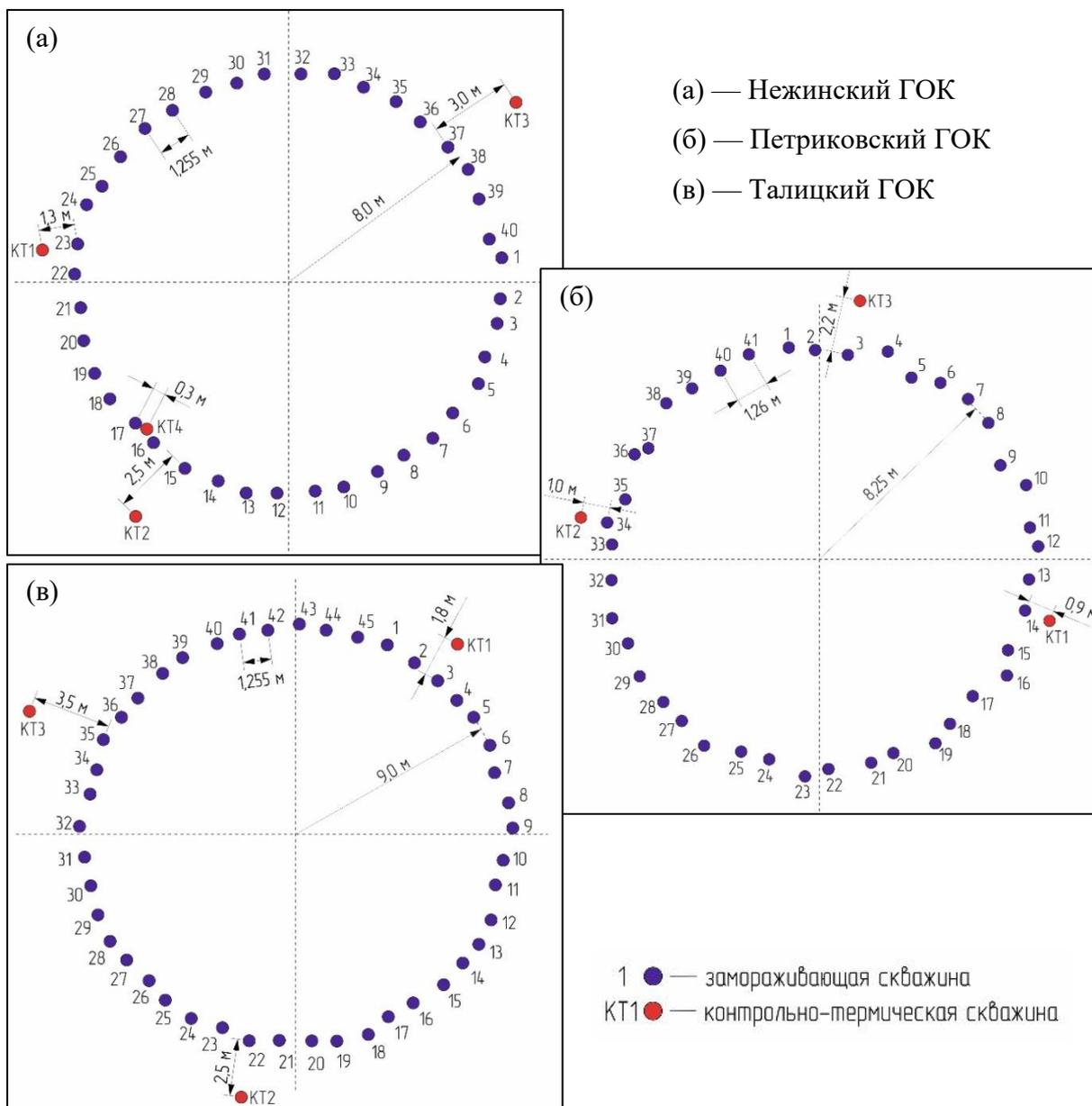


Рисунок 4.1 — Расположение замораживающих и контрольно-термических скважин шахтных стволов различных горнодобывающих предприятий

Следует отметить, что эффективность ледопородного ограждения главным образом зависит от его толщины, которая определяется расчетами для каждого исследуемого слоя замораживаемого породного массива. При этом ледопородное ограждение считается сформированным только после того, как его толщина достигла требуемых параметров по всей глубине замораживания. Таким образом, основная задача термометрического контроля заключается в определении положения границ ледопородного ограждения в замораживаемом обводненном породном массиве. Однако

внутренняя граница ледопородного ограждения, как правило, находится в пределах контура поперечного сечения шахтного ствола в проходке, или ограничена им, в связи с чем термометрические скважины не располагают внутри контура замораживающих скважин, ввиду потерь данных о температуре горных пород после начала проходки шахтного ствола.

Следовательно, определить точное положение границ формируемого ледопородного ограждения возможно только по данным контрольно-термических скважин, которые располагают на его внешней границе. При этом зачастую контрольно-термические скважины бурятся либо в контуре ледопородного ограждения, либо на удалении от его внешних границ. В таком случае необоснованное размещение термометрических скважин затрудняет процедуру определения истинной толщины ледопородного ограждения, и, как следствие, приводит к более длительному процессу активного замораживания горных пород, или, наоборот, к раннему переходу на пассивный режим заморозки. Кроме того, при выборе места заложения контрольных скважин не учитываются как их возможное (допустимое) отклонение от вертикали, так и фактическое отклонение пробуренных замораживающих скважин, а также неравномерное распространение замороженной зоны от контура замораживающих скважин. Опыт показывает, что замороженная зона распространяется, в примерном соотношении: 60 % в направлении к оси шахтного ствола, и 40 % в направлении от нее [92].

Экспериментальные измерения температуры горных пород Нежинского ГОК

В соответствии с проектом замораживания горных пород строящегося шахтного ствола № 1 Нежинского ГОК требуемая толщина прочного ледопородного ограждения в слое глины — 3,79 м, при условии, что в его пределах температура составляет не более -8 °С. Это значит, что фактическая толщина ледопородного ограждения определяется как наименьшее расстояние между двумя изотермами по разные стороны контура замораживающих скважин со значением температуры -8 °С. Таким образом, изотермы теплового поля с одинаковыми значениями температуры, для которой рассчитаны требуемые прочностные характеристики горных пород, являются фактическими границами ледопородного ограждения.

Динамика температуры слоя глины в контрольно-термических скважинах, пробуренных на замораживаемом участке породного массива строящегося шахтного ствола № 1, а также фактическое положение границ ледопородного ограждения относительно расположения термометрических и замораживающих скважин на момент

достижения им проектных параметров (90 суток после начала замораживания) представлены на рисунке 4.2.

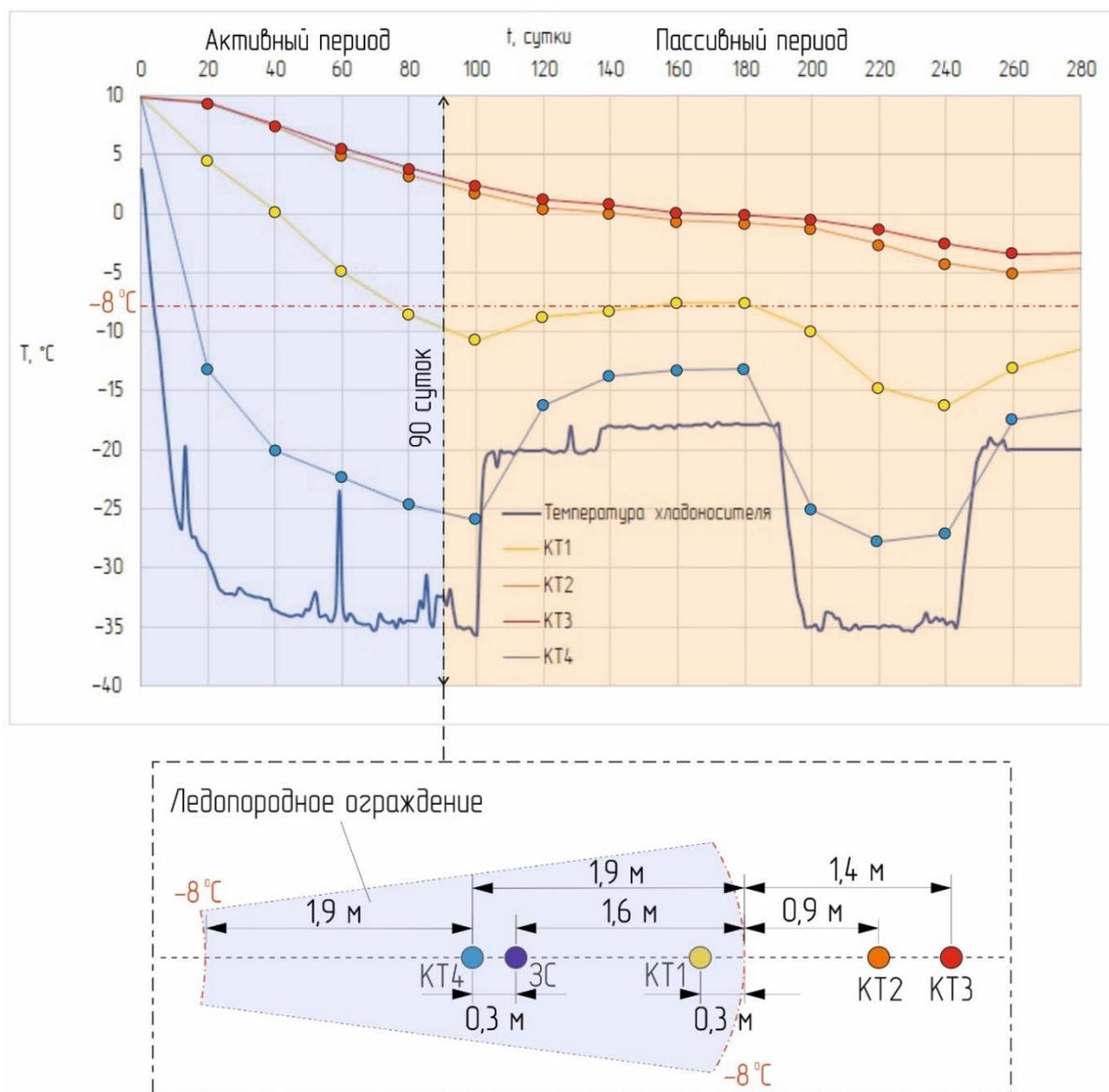


Рисунок 4.2 — Динамика температуры слоя глины в контрольно-термических скважинах и положение границ ледопородного ограждения на момент достижения им проектных параметров

На основании полученных экспериментальных данных отмечается, что в контрольно-термической скважине КТ4, расположенной на расстоянии 0,3 м от контура замораживающих скважин, температура горной породы достигла отрицательных значений на 8 сутки после начала замораживания, а в скважине КТ1, расположенной на расстоянии 1,3 м — на 43 сутки. Установлено, что графики температуры в скважинах КТ1 и КТ4, расположенных в пределах проектной толщины ледопородного ограждения, качественно повторяют график температуры прямого потока хладоносителя, циркулирующего в замораживающих скважинах. На удалении от внешней границы

ледопородного ограждения температуры в термометрических скважинах КТ2 и КТ3 до 280 суток после начала замораживания постоянно продолжали понижаться независимо от изменения температуры хладоносителя. При этом температуры в скважинах КТ2 и КТ3 на момент достижения ледопородным ограждением проектных параметров оставались положительными.

Также из рисунка 4.2 следует, что на момент достижения ледопородным ограждением требуемой толщины (90 суток после начала замораживания) ближайшая к его внешней границе контрольно-термическая скважина расположена на расстоянии 0,3 м.

Экспериментальные измерения температуры горных пород Петриковского ГОК

В соответствии с проектом замораживания горных пород строящегося шахтного ствола № 1 Петриковского ГОК требуемая толщина прочного ледопородного ограждения в слое песчаника составила 2,5 м, при условии, что в его пределах температура равна не более -8 °С.

Динамика температуры слоя песчаника в контрольно-термических скважинах, пробуренных на замораживаемом участке породного массива строящегося шахтного ствола № 1, а также фактическое положение границ ледопородного ограждения относительно расположения термометрических и замораживающих скважин на момент достижения им проектных параметров (225 суток после начала замораживания) представлены на рисунке 4.3.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в контрольно-термических скважинах КТ1 и КТ2, расположенных на расстояниях 0,9 м и 1,0 м от контура замораживающих скважин, температура песчаника на 35 сутки и 50 сутки, соответственно, после начала замораживания достигла отрицательных значений. На 160 сутки после начала замораживания горной породы отрицательные температуры зафиксированы в контрольной скважине КТ3, при этом требуемые параметры ледопородного ограждения достигнуты только спустя 65 суток.

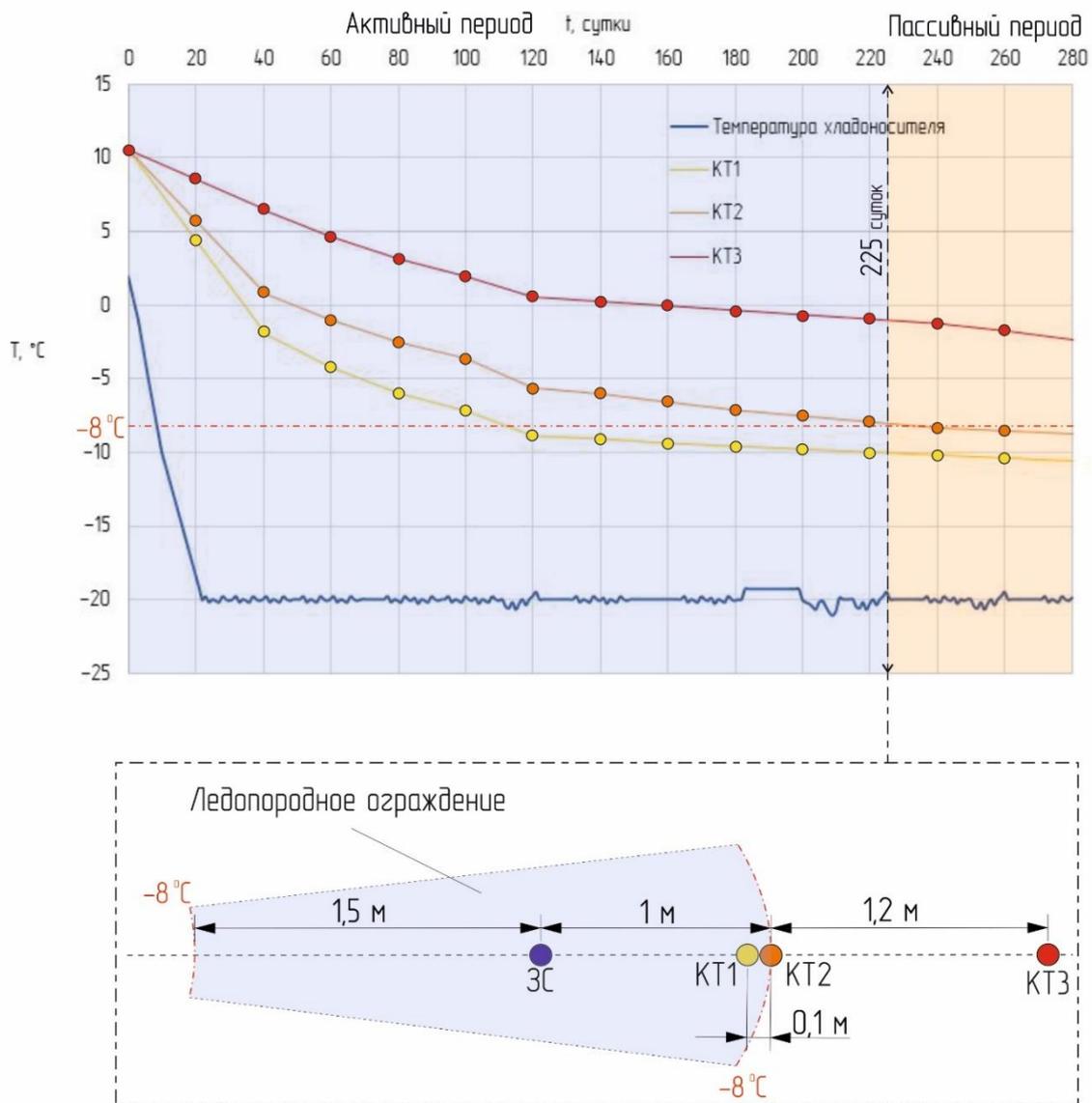


Рисунок 4.3 — Динамика температуры слоя песчаника в контрольно-термических скважинах и положение границ ледопородного ограждения на момент достижения им проектных параметров

Также из рисунка 4.3 видно, что на момент достижения ледопородным ограждением (225 суток после начала замораживания) требуемой толщины контрольно-термическая скважина КТ2 находится на его внешней границе.

Экспериментальные измерения температуры горных пород Талицкого ГОК

В соответствии с проектом замораживания горных пород строящегося шахтного ствола № 2 Талицкого ГОК требуемая толщина прочного ледопородного ограждения в слое мергеля составила 6,34 м, при условии, что в его пределах температура не превышала более -10°C .

Динамика температуры слоя мергеля в контрольно-термических скважинах, пробуренных на замораживаемом участке породного массива строящегося шахтного

ствола № 2 Талицкого ГОК, а также фактическое положение границ ледопородного ограждения относительно расположения термометрических и замораживающих скважин на момент (207 суток после начала замораживания) достижения им проектных параметров представлены на рисунке 4.4.

На основании полученных экспериментальных данных отмечается, что в контрольно-термической скважине КТ1, расположенной на расстоянии 1,8 м от контура замораживающих скважин, температура на 35 сутки после начала замораживания достигла отрицательных значений. На 110 сутки после начала замораживания горной породы отрицательные температуры имелись уже во всех контрольных скважинах, при этом требуемые параметры ледопородного ограждения достигнуты только спустя 97 суток.

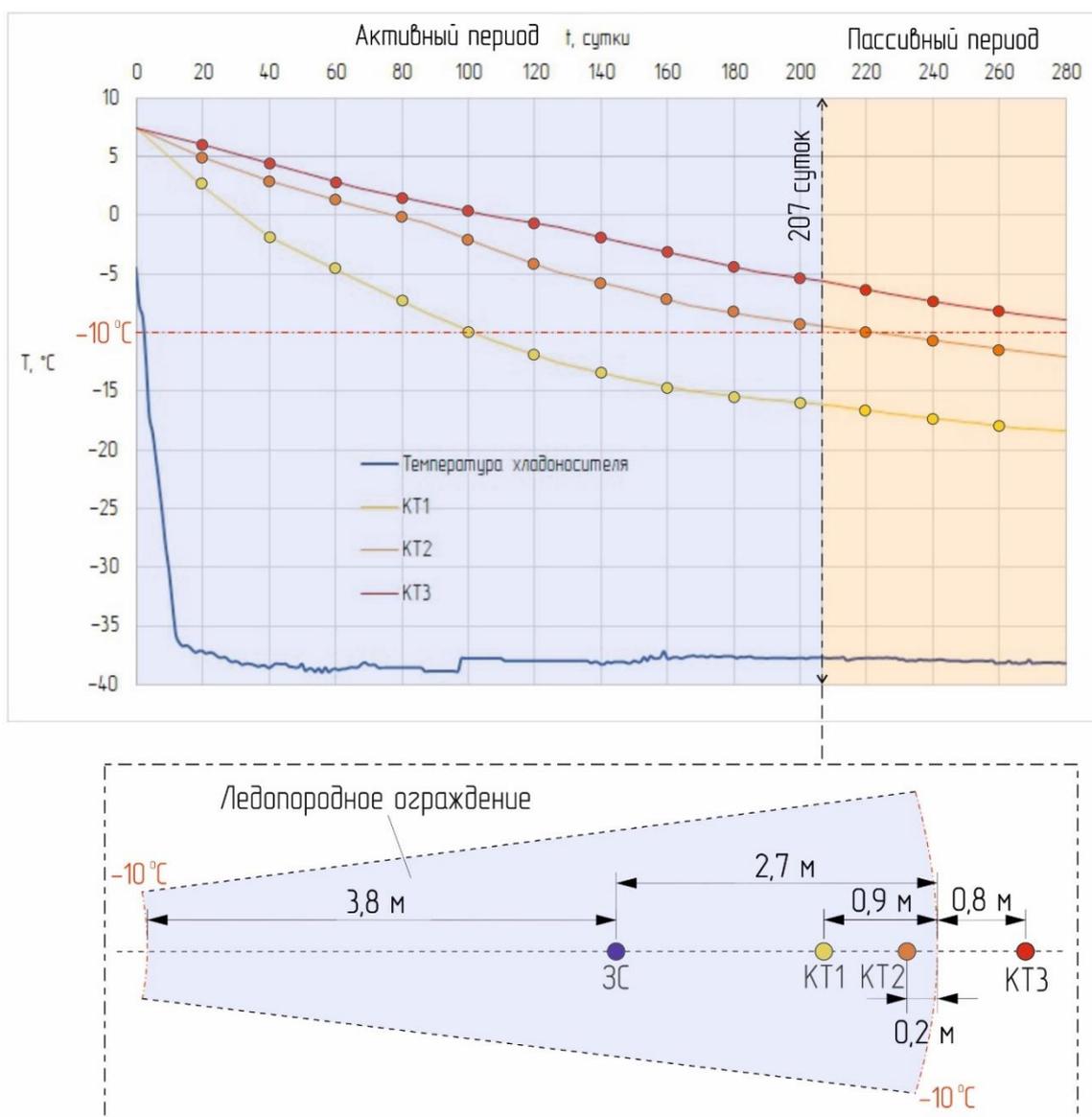


Рисунок 4.4 — Динамика температуры слоя мергеля в контрольно-термических скважинах и положение границ ледопородного ограждения на момент достижения им проектных параметров

Также из рисунка 4.4 следует, что на момент достижения ледопородным ограждением требуемой толщины (207 суток после начала замораживания) ближайшая к его внешней границе контрольно-термическая скважина расположена на расстоянии 0,2 м.

Отмечается, что по всему геологическому разрезу на каждом объекте исследования изменение температуры в слоях горных пород, слагающих участки породного массива, качественно совпадают. Количественные отличия изменений температуры в исследуемых слоях участков замораживаемого породного массива объясняются различием теплофизических параметров горных пород, а также расположением контрольных и замораживающих скважин относительно друг друга.

4.2. Исследование влияния расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана

Базовой математической моделью для описания распределения температуры в среде с учетом фазового перехода первого рода является задача Стефана. Среди наиболее эффективных и распространенных методов численного решения прямой задачи Стефана можно выделить методы с явным определением положения границы фазового перехода и методы с фиксированной сеткой [147, 174]. Реализация методов численного решения задачи Стефана с явным выделением границы в двух и трехмерных областях со сложной геометрией связана со значительными вычислительными затратами. Это приводит к недопустимым временам решения задачи оптимизации. Для решения этой проблемы в данной работе используется метод эффективной теплоемкости, относящийся к методам с фиксированной сеткой.

При решении задачи Стефана методом эффективной теплоемкости положение границы фазового перехода явно не определяется, поэтому решение обратной задачи Стефана по восстановлению положения границы фазового перехода на основе экспериментальных измерений температуры горных пород, полученных при помощи контрольно-термических скважин, сведено к решению коэффициентной обратной задачи Стефана.

Известно, что при идентификации процессов нестационарного теплообмена методами решения некорректных и обратных задач адекватность восстанавливаемых теплофизических характеристик реальным величинам во многом определяется условиями проведения эксперимента. Отсюда естественным образом возникает задача оптимального планирования эксперимента, при котором неизвестная величина определяется с наибольшей точностью [5, 35, 36, 99, 123, 141, 173, 176]. В широком

смысле планирование экспериментальных измерений температуры подразумевает определение количества и мест заложения контрольно-термических скважин, выбор измерительной аппаратуры, выбор методов обработки собираемых данных, методов калибровки измерительной аппаратуры посредством сравнения с эталонными датчиками и прочее. В работе для повышения точности и надежности решений, получаемых в результате решения обратной задачи Стефана, рассматривается вопрос выбора количества и мест заложения термометрических скважин, при котором корректировка теплофизических свойств породного массива будет проводиться с наибольшей точностью.

При определении оптимального положения термометрической скважины эффективным критерием сравнения матриц Фишера, соответствующих различным условиям проведения эксперимента, является их определитель. При исследовании процесса формирования ледопородного ограждения цель решения коэффициентной обратной задачи Стефана заключается в восстановлении распределения температурного поля в замораживаемом породном массиве. Вследствие чего, первоначально важно определить, какой теплофизический коэффициент оказывает наибольшее влияние на распределение температуры, так как точность восстановления температуры будет в значительной степени зависеть от его значения.

Вариационная постановка обратной задачи Стефана записывается следующим образом. Пусть известно изменение температуры от времени $T_i = T_i(t)$ при $t \in [t_0, t_k]$ в m внутренних точках $(x_i, y_i) \in \Omega$:

$$T|_{(x_i, y_i)} = T_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (4.1)$$

Требуется найти значение λ_{sd}^{opt} коэффициента λ_{sd} , при котором функционал невязки J достигает наименьшего значения:

$$\lambda_{sd}^{opt} = \operatorname{arginf} J(\lambda_{sd}). \quad (4.2)$$

Геометрия расчетной области Ω представлена на рисунке 4.5.

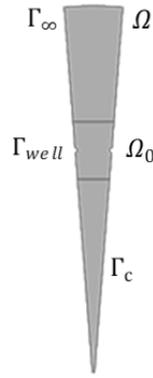


Рисунок 4.5 — Геометрия расчетной области Ω .

Ω_0 — область, заключенная между двумя горизонтальными линиями, Γ_{well} — граница замораживающей скважины, Γ_∞ — внешняя граница расчетной области, $\Gamma_c = \partial\Omega(\Gamma_{well} \cup \Gamma_\infty)$

Рассматривается два вида функционала J :

$$J(\lambda_{sd}) = \sum_{i=1}^m J_i(\lambda_{sd}, t_k),$$

$$J_i^1(\lambda_{sd}, t_k) = \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} [T(x_i, y_i, t, \lambda_{sd}) - T_i(t)]^2 dt, \quad (4.3)$$

$$J_i^2(\lambda_{sd}, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} [T(x_i, y_i, t, \lambda_{sd}) - T_i(t)]^2 dt. \quad (4.4)$$

В соотношении (4.3) деление на длину промежутка интегрирования позволяет учесть изменение отклонения графиков $T(x_i, y_i, t, \lambda_{sd})$ со временем.

Для постановки задачи планирования оптимального эксперимента первоначально необходимо выделить условия проведения эксперимента, которые могут быть изменены в заданном диапазоне с целью повышения точности решения поставленной обратной задачи. Исходя из особенностей технологического процесса формирования ледопородного ограждения, такими условиями могут быть расположение и количество термометрических скважин, продолжительность наблюдений [5, 123, 141, 173].

Пусть Ξ — множество допустимых экспериментальных планов расположения наблюдательных скважин, то есть множество точек, в которых они могут быть расположены. $\xi \subset \Xi$ множество точек, в которых скважины расположены:

$$\xi = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}. \quad (4.5)$$

Тогда информационная матрица Фишера определяется следующим образом [5]:

$$\mathbf{F}(\xi, t_k) = \frac{1}{N(t_k - t_0)} \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{S}(\theta, \xi)^T \mathbf{S}(\theta, \xi) dt. \quad (4.6)$$

Здесь $\mathbf{S}(\theta)$ — матрица чувствительности, которая для общего случая идентификации m параметров $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$ при решении обратной задачи, имеет вид:

$$\mathbf{S}(\theta) = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial u}{\partial \theta_1} \right|_{(x_1, y_1)} & \cdots & \left. \frac{\partial u}{\partial \theta_m} \right|_{(x_1, y_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial u}{\partial \theta_1} \right|_{(x_N, y_N)} & \cdots & \left. \frac{\partial u}{\partial \theta_m} \right|_{(x_N, y_N)} \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

где $\frac{\partial u}{\partial \theta_1}$ — вариация температуры u относительно параметра θ_1 .

В качестве скалярного критерия оптимальности экспериментального плана рассматривается D – критерий [5]:

$$\Phi(\xi, t_k) = -\ln \det \mathbf{F}(\xi, t_k), \quad \xi \in \Xi. \quad (4.8)$$

Оптимальный план ξ^* эксперимента находится из решения задачи минимизации функции Φ :

$$\xi^* = \operatorname{arginf} \Phi(\xi, t_k), \quad \xi \in \Xi. \quad (4.9)$$

В данной работе для поиска минимума функции Φ используется метод сопряженных градиентов. Так как обратная задача (4.2) записана только относительно одного коэффициента λ_{sd} , то информационная матрица Фишера сводится к скалярной величине.

На основе стандартного рассуждения [4], было установлено, что краевая задача для вариации $w = \frac{\partial T}{\partial \lambda_{sd}}$ температуры T относительно коэффициента λ_{sd} имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho c_{eff} w_t &= (\lambda w_x)_x + (\lambda w_y)_y + (\lambda_x w)_x + (\lambda_y w)_y - (\rho c_{eff}) T_t w \\ &+ (\theta u_x)_x + (\theta u_y)_y, \quad (x, y) \in \Omega, t \in [t_0, t_k], \end{aligned} \quad (4.10)$$

с начальным условием:

$$w|_{t=t_0} = 0, \quad (4.11)$$

и граничными условиями:

$$w|_{\Gamma_{well}} = 0, \quad w|_{\Gamma_{\infty}} = 0, \quad \left. \frac{\partial w}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Gamma_R} = 0, \quad \left. \frac{\partial w}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Gamma_c} = 0. \quad (4.12)$$

Здесь ρ — коэффициент плотности; c_{eff} — эффективная теплоемкость; Γ_{well} — граница замораживающей скважины, Γ_{∞} — внешняя граница расчетной области.

На основе изложенных сведений алгоритм для определения оптимального плана эксперимента формулируется следующим образом:

1. определяется решение T прямой задачи Стефана;
2. из краевой задачи (4.10) определяется решение w ;
3. находится решение задачи оптимизации (4.9).

Решение прямой задачи Стефана и краевой задачи (4.10) выполняется методом конечных элементов в Comsol Multiphysics.

Результаты вычислительных экспериментов

Рассматриваются результаты решения задачи оптимального планирования эксперимента по определению положения одной контрольно-термической скважины для случая, когда множество ξ состоит из одной точки.

Решение задачи оптимального планирования выполнено для условий исследуемых слоев горных пород рудника Петриковского ГОК. Установлено, что наименьшая скорость формирования ледопородного ограждения наблюдалась в слое мела (интервал залегания 85,6 м — 136,3 м), а наибольшая скорость — в слое песчаника кварцевого (интервал залегания 146,3 м — 170,7 м). Теплофизические свойства исследуемых слоев приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Теплофизические свойства исследуемых слоев породного массива*

Слой	λ_{sd} , Вт/(м·К)	λ_{lq} , Вт/(м·К)	ρ_{sd} , кг/м ³	ρ_{lq} , кг/м ³	c_{sd} , Дж/(кг·К)	c_{lq} , Дж/(кг·К)	a_{sd} , м ² /с	a_{lq} , м ² /с
Мел	2,18	1,31	1771	1816	1126	1767	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$4,08 \cdot 10^{-7}$
Песчаник кварцевый	6,145	5,295	2029	2058	911	1290	$3,32 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$

* — физические свойства влагонасыщенных и замороженных горных пород определены по правилу смеси

Решение задачи оптимального планирования для слоя мела

На рисунке 4.6 представлены распределения функции Φ в области $\Xi = \Omega_0$ для исследуемого слоя мела при различных временах t_k окончания измерений температуры в контрольной скважине с момента замораживания $t_0 = t_{fr} = 72$ ч.

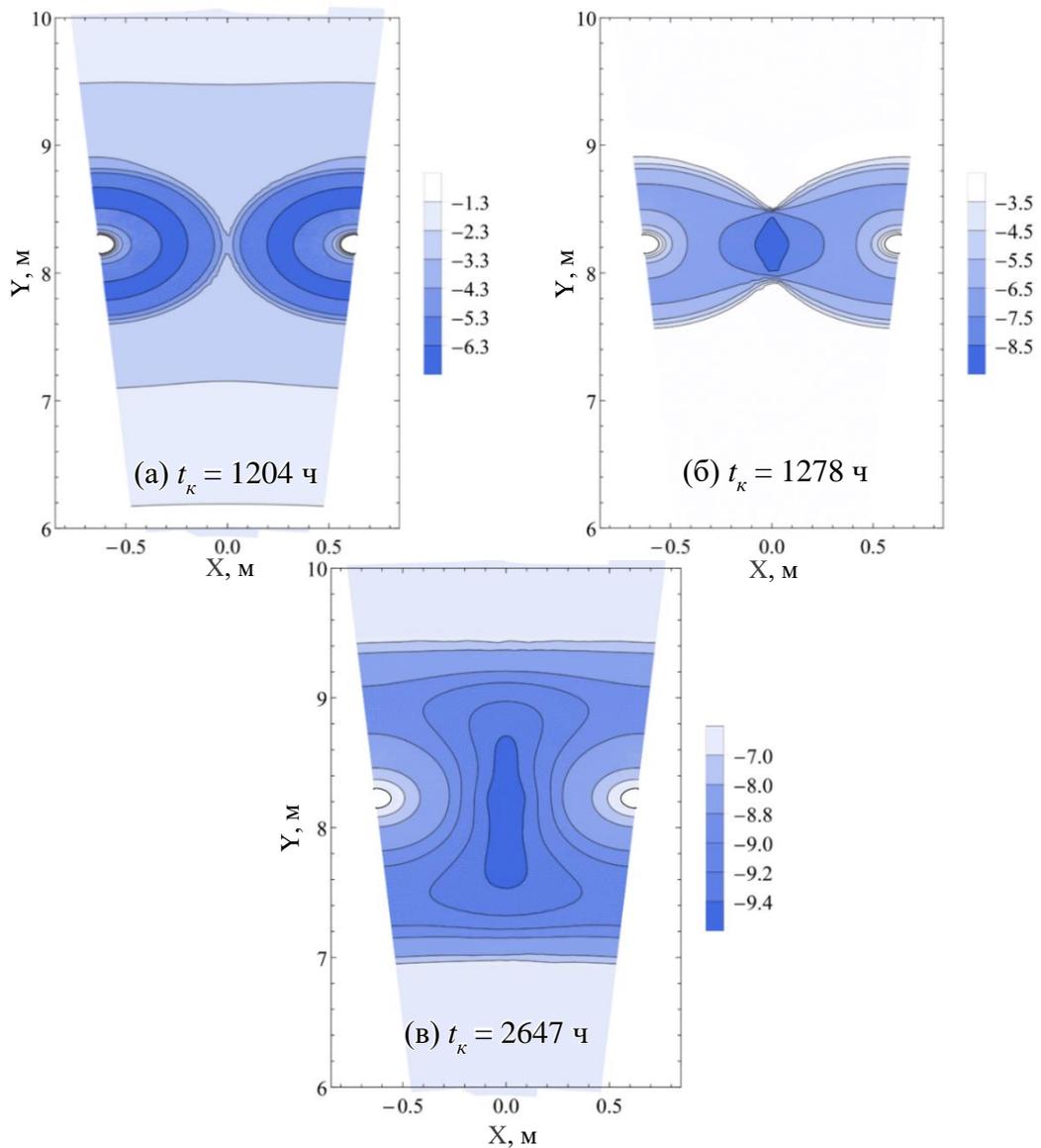


Рисунок 4.6 — Распределение D – критерия Φ в области Ω_0 при различных t_k для слоя мела

На рисунке 4.6а представлен график для момента времени $t_k = t_{min,ph} = 1204$ ч, когда происходит смыкание границ фазового перехода. Для данного момента минимумы функции Φ расположены на кривых, находящихся в двух областях вблизи замораживающих скважин. На рисунках 4.6б и 4.6в представлены графики для моментов времени $t_k = t_{min,infl} = 1278$ ч, $t_k = t_{min,pr} = 2647$ ч, соответственно, где $t_{min,pr}$ — время достижения ледопородным ограждением проектной толщины.

На данных графиках видно, что для этих времен минимум функции Φ расположен в замковой плоскости, на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

Путем решения оптимизационной задачи (4.9) для времен t_k из промежутка от $t_{min,infl}$ до $t_{min,pr}$ с шагом 342,25 ч установлено, что во всех случаях точка минимума функции Φ совпадает с точкой, имеющей наименьшую температуру.

Установим связь между значениями функции Φ и функционалами J_i^1, J_i^2 , определенных в точках (x_1, y_1) — точка с наименьшей температурой на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами, и (x_2, y_2) — точка находится на расстоянии 1 метра от точки (x_1, y_1) в сторону от центра кругового сектора, при λ_{sd} , равным удвоенному табличному значению. Функции T_i определяются из решения прямой задачи с табличным значением коэффициента теплопроводности, рассмотренного в точках (x_i, y_i) . На рисунке 4.7 представлен график функции Φ в зависимости от t_k в точках (x_i, y_i) .

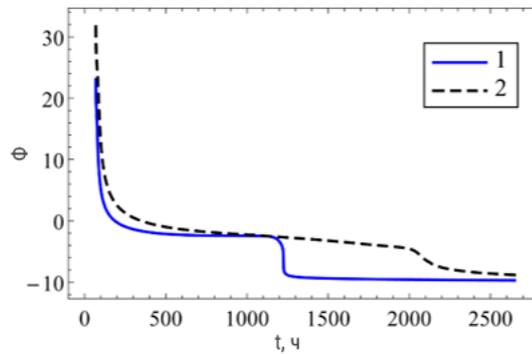


Рисунок 4.7 — График функции Φ от времени t_k : 1 – в точке (x_1, y_1) , 2 – в точке (x_2, y_2)

Момент времени $t_{min,infl}$ выбирается после резкого убывания графика.

На рисунке 4.8 представлены графики J_i^1 и J_i^2 от t_k для слоя мела.

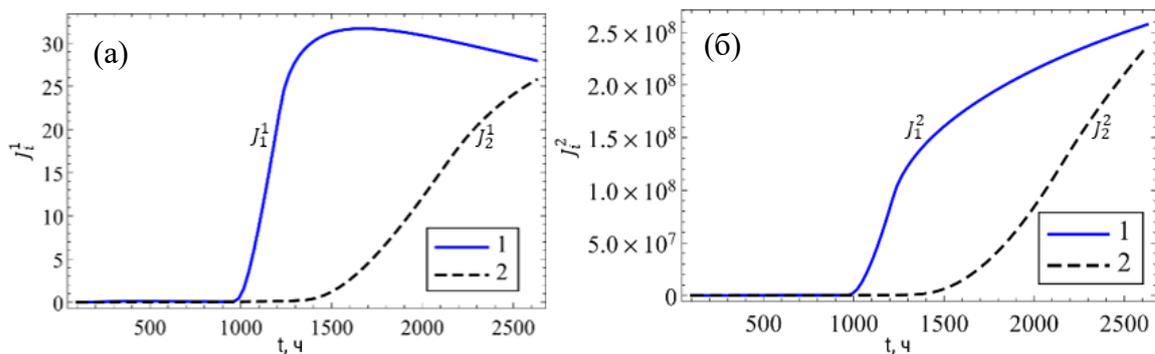


Рисунок 4.8 — Графики функционалов J_i^1 (а) и J_i^2 (б) от t_k , 1 – $i = 1$, 2 – $i = 2$

Из графиков видно, что при уменьшении значения Φ значение J увеличивается. В точке (x_1, y_1) наблюдается быстрое убывание Φ в промежутке времени от 1150 ч до

1300 ч, при этом значение J_1^1 на промежутке от 1000 ч до 1500 ч быстро возрастает. После достижения максимального значения 31,68 при $t_k = 1669$ ч — J_1^1 начинает убывать.

Сравнивая графики, приведенные на рисунках 4.7 и 4.8, можно сделать вывод, что для тех t_k , при которых отклонение графиков Φ в точках (x_1, y_1) и (x_2, y_2) значительно, отклонение между J_i^1 и J_i^2 так же значительно. При сближении графиков Φ , отклонение между J_i^1 и J_i^2 уменьшается. К моменту достижения ледопородным ограждением проектной толщины значение $J_1^1 = 27,98$ больше, чем $J_2^1 = 25,76$. Аналогичное наблюдение справедливо для J_1^2 и J_2^2 .

Исходя из вышеизложенного следует, что в исследуемом слое мела для решения обратной задачи (4.2) с наибольшей точностью до момента достижения ледопородным ограждением проектных размеров, термометрическую скважину следует размещать в точке с минимальной температурой — на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

Решение задачи оптимального планирования для слоя песчаника кварцевого

На рисунке 4.9 представлены распределения функции Φ в области $\Xi = \Omega_0$ для исследуемого слоя песчаника кварцевого при различных временах t_k окончания измерений температуры в контрольной скважине с момента начала замораживания.

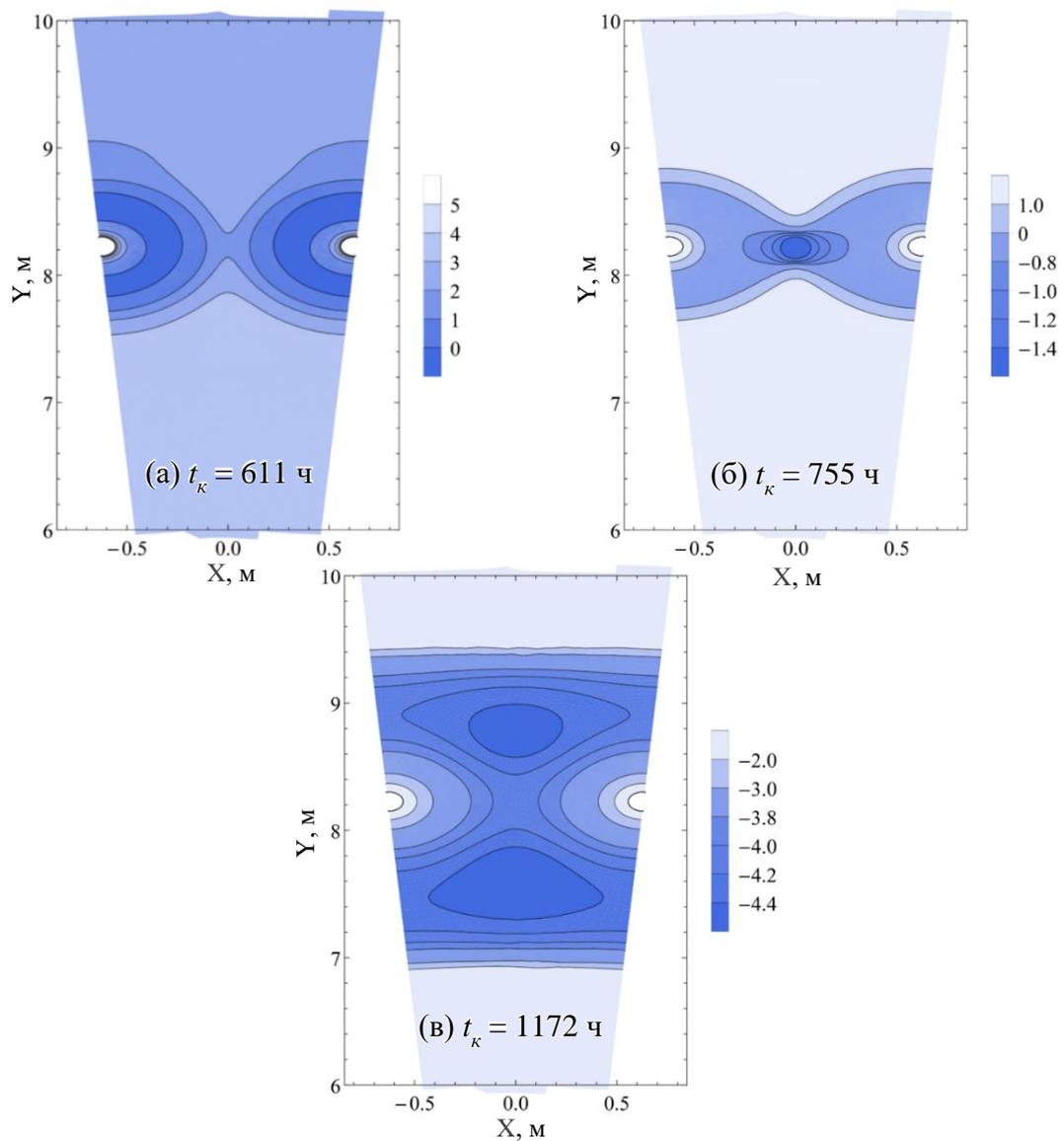


Рисунок 4.9 — Распределение D – критерия Φ в области Ω_0 при различных t_k для слоя песчаника кварцевого

На рисунке 4.9а представлен график для момента времени $t_k = t_{min,ph} = 611$ ч, когда происходит смыкание границ фазового перехода. На рисунках 4.9б и 4.9в представлены графики для моментов времени $t_k = t_{min,infl} = 755$ ч, $t_k = t_{min,pr} = 1172$ ч, соответственно.

Согласно графикам на рисунке 4.6 и рисунке 4.9 видно, что качественно распределения Φ в слое песчаника совпадают с распределением в слое мела. Так как в слое песчаника ледопородное ограждение формируется значительно быстрее, чем в слое мела, то возникновение минимумов функции Φ в областях, расположенных выше и ниже замораживающих скважин, происходит к моменту достижения ледопородным ограждением проектной толщины. При этом глобальный минимум расположен в зоне ближе к центру выработки. При этом, путем решения задачи оптимизации (4.9) было

установлено, что в момент времени $t_k = t_{min,infl} = 1278$ ч точка минимума функции Φ совпадает с точкой минимальной температуры, которая, так же как и для слоя мела, имеет координаты (x_1, y_1) — точка с наименьшей температурой на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

На основании сравнения графиков на рисунках 4.6 и 4.9 следует, что значения функции Φ в близкие моменты времени в слое песчаника кварцевого больше, чем в слое мела. Таким образом, в слое песчаника кварцевого определение коэффициента теплопроводности в зоне льда путем решения обратной задачи (4.2) выполняется с меньшей точностью, чем для слоя мела. При этом точка минимума функции Φ как для слоя мела, так и для песчаника кварцевого находится в замковой плоскости ледопородного ограждения. Это указывает на то, что оптимальные координаты скважины наименьшим образом зависят от теплофизических параметров горных пород.

Решение задачи оптимального планирования для слоя мела при отклонении замораживающих скважин от вертикали

Дальнейшее исследование заключалось в определении оптимального расположения для контрольно-термической скважины в слое мела с учетом отклонения замораживающих скважин от вертикали. В соответствии с данными инклинометрии минимальное расстояние между скважинами составляет 0,717 м, максимальное расстояние 1,753 м., причем данные скважины расположены рядом друг с другом.

На рисунке 4.10 представлены графики распределения функции Φ в моменты времени $t_k = t_{sur,ph2} = 1722$ ч, $t_k = t_{sur,pr1} = 2364$ ч, $t_k = t_{sur,pr2} = 3056$ ч, где $t_{sur,ph2}$ — момент смыкания границ фазового перехода, распространяющихся от скважин с максимальным расстоянием между ними, $t_{sur,pr1}$, $t_{sur,pr2}$ — момент достижения ледопородным ограждением проектной толщины между замораживающими скважинами, расстояние между которыми минимально и максимально соответственно.

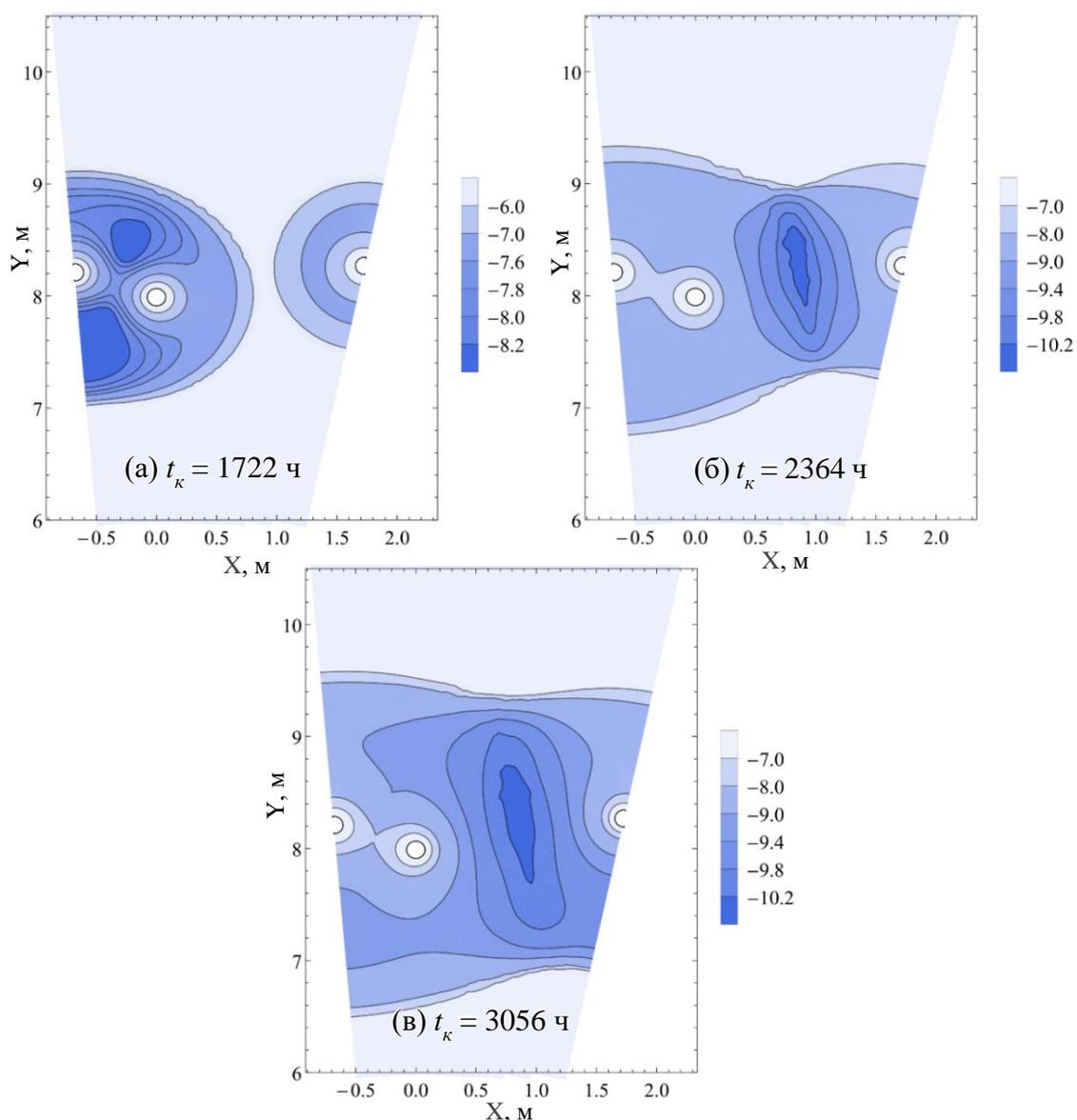


Рисунок 4.10 — Распределение D – критерия Φ в области Ω_0 при различных t_k для слоя мела при отклонении замораживающих скважин от вертикали

На основе решения оптимизационной задачи (4.9) для t_k времени от 1790 ч до 8033 ч с шагом 1246 ч установлено, что точка глобального минимума Φ совпадает с точкой с минимальной температурой между замораживающими скважинами с максимальным расстоянием. Следует отметить, что в момент времени $t_{sur,ph2}$ значение Φ сверху и снизу от замораживающих скважин с минимальным расстоянием, меньше, чем между ними. В момент достижения ледопородным ограждением между этими скважинами проектной толщины глобальный минимум Φ находится между скважинами с максимальным расстоянием, после чего его положение не изменяется.

Из приведенных результатов следует, что для рассмотренного расположения замораживающих скважин с учетом их отклонения от вертикали оптимальное

положение контрольной скважины соответствует наименьшей температуре на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

Кроме этого, установлено, что проведение измерений температуры в двух контрольных скважинах не позволит повысить точность решения обратной задачи. Использование двух термометрических скважин может быть связано только с необходимостью осреднения измерений.

Следует отметить, что в работе рассмотрен случай, когда в ходе решения обратной задачи требуется определить только один модельный параметр — теплопроводность в зоне льда. При рассмотрении обратных задач с определением других теплофизических свойств задачи положение минимума Φ может измениться.

4.3. Анализ требуемого количества контрольно-термических скважин для выполнения всестороннего контроля параметров ледопородного ограждения

Рассчитываемые параметры ледопородного ограждения напрямую зависят от количества контрольно-термических скважин, используемых для осуществления мониторинга за тепловым полем участка замораживаемого породного массива вокруг строящихся шахтных стволов. Однако, вопрос о требуемом количестве термометрических скважин, которое позволит обеспечить получение информации о состоянии ледопородного ограждения в полном объеме (по всему замораживаемому контуру), а, следовательно, и безопасность ведения горных работ при проходке шахтного ствола, остается нерешенным. Поэтому необходимо провести исследование, направленное на определение оптимального количества контрольно-термических скважин, требуемых для выполнения качественного контроля состояния ледопородного ограждения.

При определении оптимального количества термометрических скважин следует учитывать два основных фактора:

1. повышение безопасности за счет получения наиболее полной информации о температуре горных пород на всем участке замораживаемого породного массива, с учетом возможности раннего предупреждения аварийной ситуации при выходе из работы замораживающих колонок или наличии в породном массиве локальных неоднородностей;
2. обеспечение минимальных сроков и затрат на бурение, а также обустройство контрольно-термических скважин.

Следует отметить, что данные факторы находятся в разногласии между собой. Чем больше количество контрольно-термических скважин, тем более достоверное

представление о параметрах состояния ледопородного ограждения во всем объеме замораживаемого породного массива, а значит и большая вероятность раннего предотвращения аварии, но с другой стороны — тем более высокие затраты на производство работ по бурению и обустройству скважин, и наоборот. Как правило, в целях экономии финансовых и трудовых ресурсов предпочтение отдается второму фактору, в связи с чем количество контрольно-термических скважин при искусственном замораживании горных пород зачастую принимается ограниченным (3, 4 скважины). При этом задача по нахождению максимального количества термометрических скважин, обеспечивающих всесторонний контроль параметров ледопородного ограждения и исключение аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя замораживающих колонок, прежде не рассматривалась.

По этой причине выполнено многовариантное численное моделирование, в процессе которого исследовалось влияние поломки двух смежных замораживающих колонок на распределение температуры в слое горной породы. Выбор двух, а не одной замораживающей колонки обосновывался тем, чтобы в окрестности неисправных колонок ледопородное ограждение после выхода их из строя не продолжало формироваться в течение длительного времени (более 100 суток). В качестве критерия K , позволяющего оценить влияние поломки колонок, выступало рассогласование температур:

$$K = T_1 - T_2, \quad (4.13)$$

где T_1 — температура породного массива при учете выхода из строя двух соседних замораживающих колонок, °С; T_2 — температура породного массива без учета выхода из строя двух соседних замораживающих колонок, °С.

Таким образом, требовалось найти границы зон рассогласования температурных полей без и с отключением замораживающих колонок в конкретные промежутки времени. Моделирование заключалось в решении прямой задачи Стефана на основе разработанной и откалиброванной модели слоя мергеля, имеющего наибольшую теплопроводность среди горных пород представленных в таблице 4.1. Рассмотрен случай, когда спустя 5 суток после начала замораживания мергеля выходят из строя две смежные колонки. Данный вариант соответствует неблагоприятному развитию событий, при котором в начальный период замораживания теплопритоки являются максимальными.

Результат распределения температуры в слое мергеля спустя 5 суток после начала замораживания, для случая нормальной работы всех замораживающих колонок, представлен на рисунке 4.11.

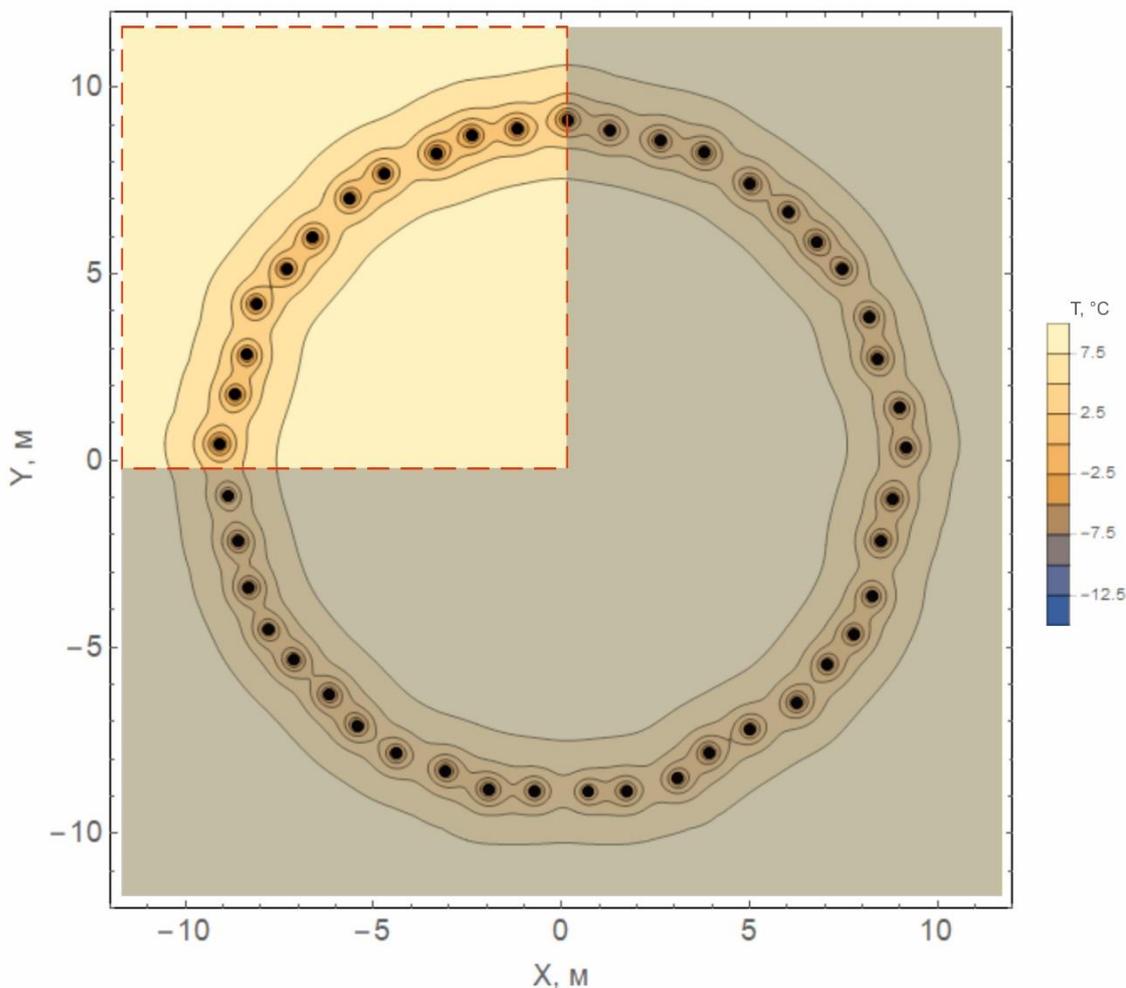


Рисунок 4.11 — Распределение температуры в исследуемом слое мергеля спустя 5 суток после начала его замораживания

На рисунке 4.12 приведены рассогласования температурных полей без и с отключением двух смежных замораживающих колонок: а) через сутки после выхода из строя колонок, б) через 15 суток и в) через 25 суток.

Отмечается, что точность измерений большинства приборов, с помощью которых определяется распределенная температура горных пород в контрольных скважинах, составляет $\pm 1,0$ °С. Поэтому рассчитанные области с рассогласованием температур, значения которых находятся в пределах точности измерительных проборов, в реальных условиях не могут быть зафиксированы в окрестности контрольно-термических скважин.

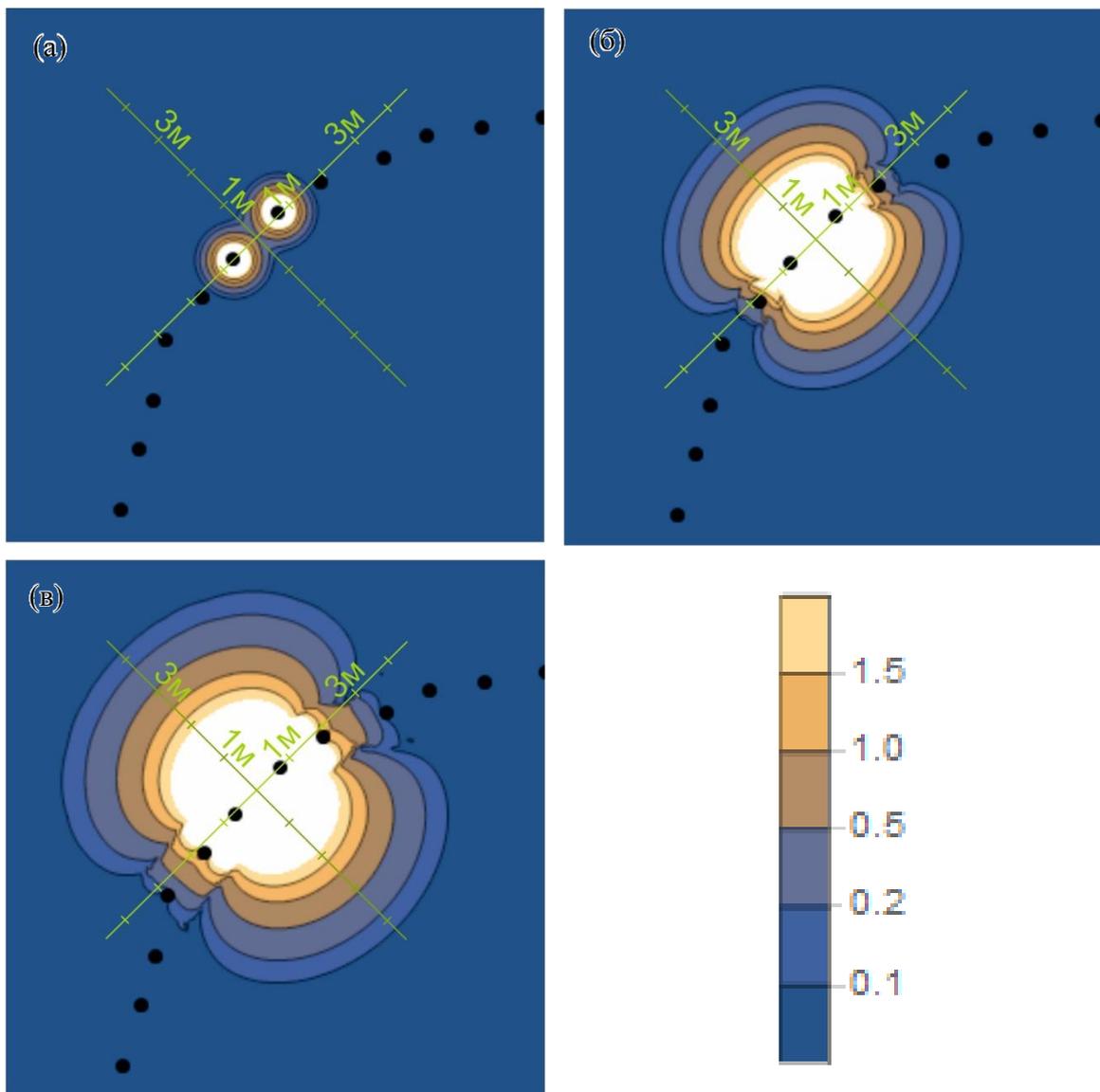


Рисунок 4.12 — Рассогласование температурных полей с учетом и без учета отключения замораживающих колонок

Из рисунка 4.12 видно, что рассогласование температур более чем на $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, через сутки после выхода из строя замораживающих колонок, находятся на их границе. Спустя 15 суток границы фиксируемой области рассогласования увеличиваются и находятся в радиусе 1,5 м от замораживающих скважин, через 25 суток — в радиусе 2,0 м. На основании анализа следует, что выявить аварийную ситуацию, связанную с выходом из строя замораживающих колонок, в начальный период ее развития не представляется возможным. Кроме этого, для того чтобы обеспечить всесторонний контроль состояния ледопородного ограждения, количество контрольно-термических скважин должно быть значительным. Например, для рассматриваемого выше варианта контрольно-термических скважин требуется не менее 30 % от общего количества замораживающих скважин, при этом достоверное рассогласование температур будет зафиксировано только через 15 суток. Необходимо отметить, что замораживание горной породы вокруг

шахтного ствола осуществлялось с применением 45 замораживающих скважин с расстоянием между ними равным 1,26 м.

4.4. Обоснование пространственного разрешения измерений распределенной температуры горных пород

Как правило, измерения температуры горных пород в контрольно-термических скважинах производятся на уровне кровли и почвы каждого водоносного горизонта, однако, как показывают данные оптоволоконной термометрии, температура в интервале залегания даже одного горизонта может варьироваться в значительных пределах.

На рисунке 4.13 представлено сравнение результатов экспериментальных измерений температуры породного массива в контрольно-термической скважине КТЗ шахтного ствола рудника Талицкого ГОК, которые получены при помощи оптоволоконного кабеля и локальных датчиков.

Отмечается, что в интервале замораживания породного массива выделено четыре основных водоносных горизонта с различными ожидаемыми водопритоками.

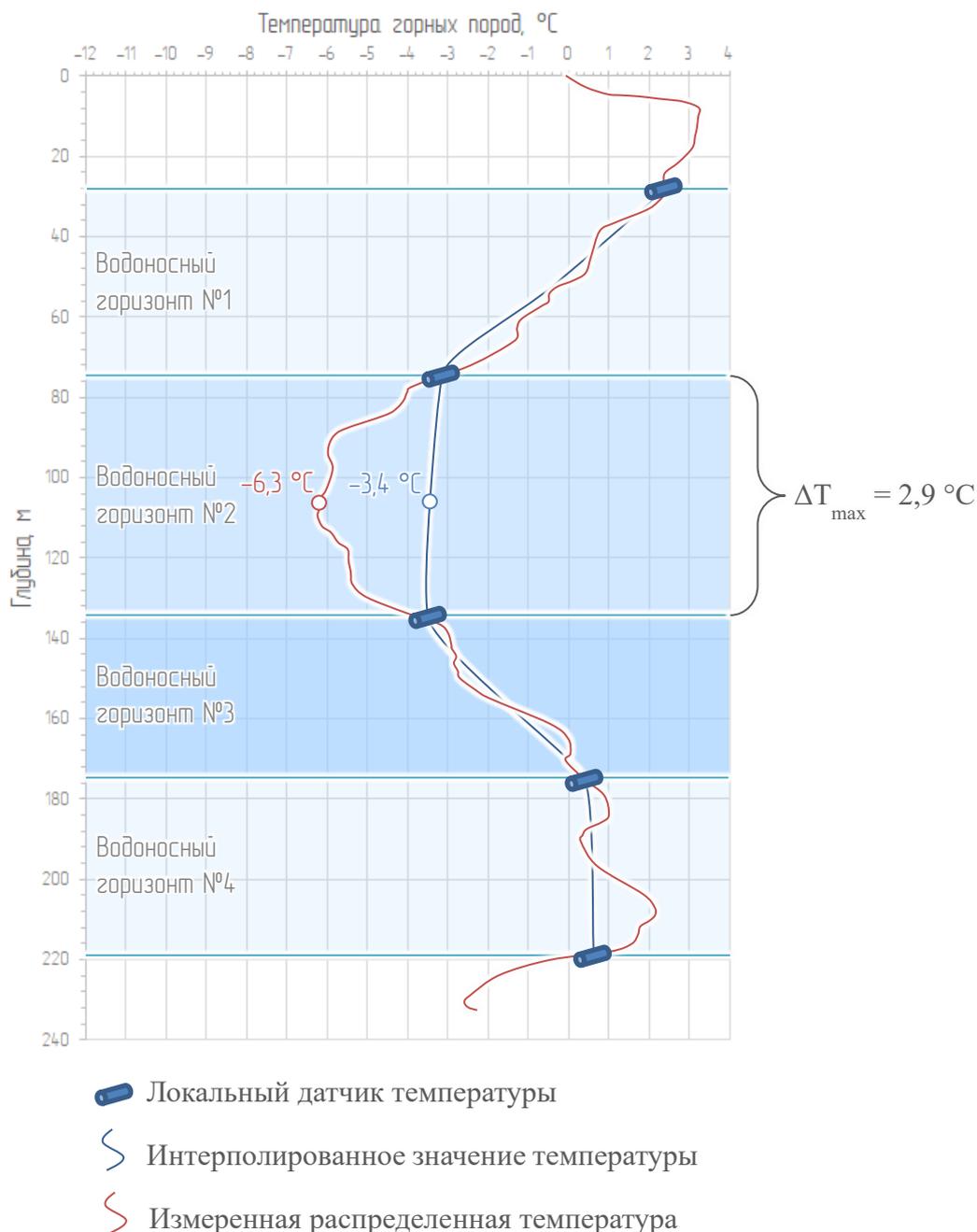


Рисунок 4.13 — Результаты экспериментальных измерений температуры породного массива в контрольно-термической скважине, полученные при помощи оптоволоконного кабеля и локальных датчиков

Сравнительный анализ результатов показывает, что ошибка определения фактической температуры может достигать 2,9 °C.

В целях получения точных данных о тепловом поле замораживаемого участка породного массива, учитывая развитие технологии оптоволоконной термометрии, требуется решить вопрос о том, через какие минимальные интервалы необходимо и достаточно производить измерения температуры горных пород по глубине контрольно-термической скважины.

Для обоснования пространственного разрешения измерений температуры замораживаемых горных пород, прежде всего, следует использовать данные инженерно-геологических изысканий, включающие бурение вертикальных контрольно-стволовых скважин в местах расположения проектируемых выработок (геологическая колонка и описание керна). На основании полученных данных о бурении, включающих геологический разрез по оси каждого планируемого к строительству шахтного ствола, выделяются и объединяются близкие по составу и строению горные породы, слагающие породный массив.

Объединение горных пород в укрупненные литологические разности производится по теплофизическим характеристикам ($\lambda_{sd}, \lambda_{lq}, c_{sd}, c_{lq}, w$) при помощи соотношения:

$$\Delta = \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{max}}, \quad (4.14)$$

где x_{max} — максимальное значение теплофизической характеристики в выделенном слое горной породы; x_{min} — минимальное значение теплофизической характеристики в выделенном слое горной породы.

Следует отметить, что объединение слоев горных пород осуществляется таким образом, чтобы величина Δ в выделенном слое, составляла не более 30 % [88]. При этом, как показывает анализ динамики экспериментальных измерений температуры замораживаемого слоистого породного массива, значение мощности укрупненной литологической разности не должно составлять менее 2 метров. Температура в маломощном слое в условиях его замораживания определяется температурой выше- или нижележащих более мощных литологических разностей, что объясняется влиянием вертикальных тепловых потоков через границы слоев.

На рисунке 4.14 приведен геологический разрез с выделенными на основании соотношения (4.14) укрупненными литологическими разностями и распределенная температура горных пород.

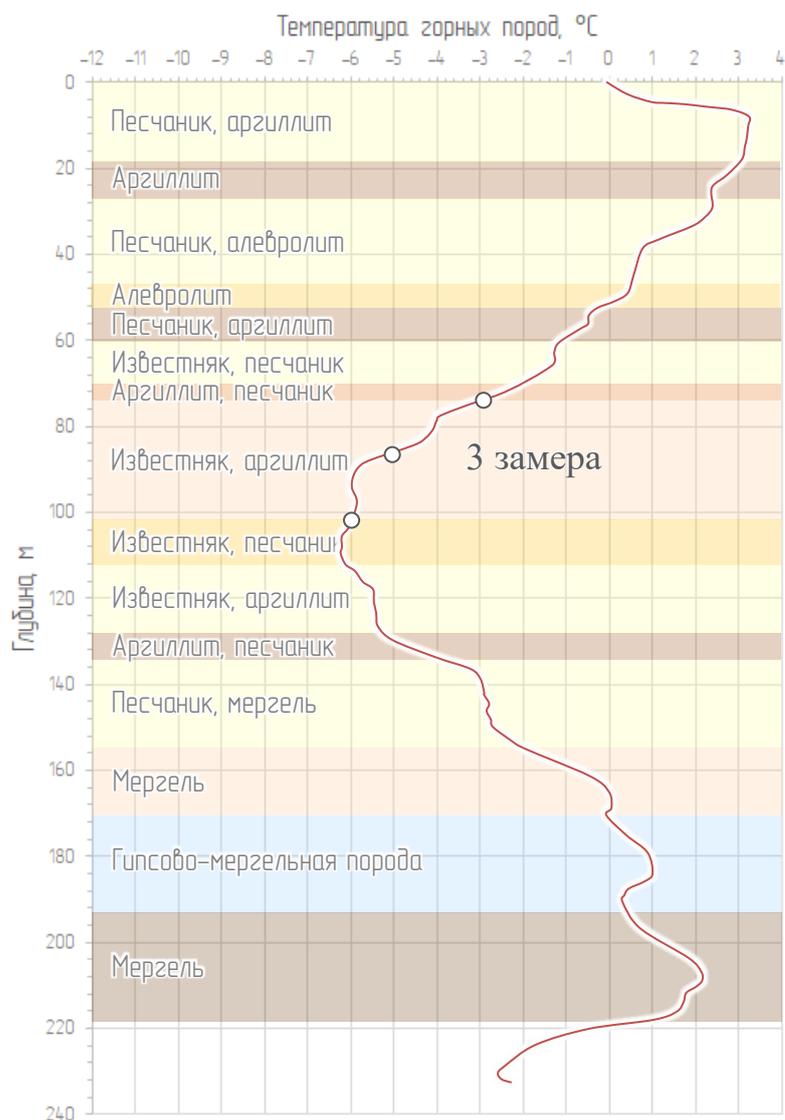


Рисунок 4.14 — Укрупненные литологические разности и распределенная температура породного массива в контрольно-термической скважине

В дальнейшем для получения детальной информации об изменении температуры по глубине каждой выделенной литологической разности следует производить минимум три измерения. Два измерения должны выполняться на границах укрупненного слоя горных пород, и один в середине. Таким образом, при мощности литологической разности равной 2 метрам и необходимости проведения в нем 3 замеров температуры пространственное разрешение измерений распределенной температуры горных пород должно быть не более 1 метра.

4.5. Методика определения оптимальных технологических параметров способа термометрического контроля

На основании проведенной статистической обработки экспериментальных измерений температуры замораживаемых горных пород и исследования влияния

расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана получены следующие результаты по определению оптимального расположения контрольно-термических скважин на участке строительства шахтных стволов.

- Расположение контрольных скважин на промышленной площадке строительства шахтных стволов обуславливается проектными параметрами ледопородного ограждения, координатами замораживающих скважин и необходимостью получения данных о температуре породного массива на различных его участках.
- Выбор мест заложения термометрических скважин следует производить с учетом отклонений замораживающих скважин от заданного направления (от вертикали). Таким образом, бурение контрольных скважин должно производиться только после бурения замораживающих скважин и проведения работ по инклинометрии.
- В целях точного определения проектных параметров ледопородного ограждения и времени их достижения контрольно-термическую скважину необходимо размещать на внешней границе ледопородного ограждения с его наибольшим расчетным значением требуемой толщины по всей глубине замораживания. Кроме того, термометрия данной скважины позволит качественно управлять процессом искусственного замораживания при переходе на пассивные режим замораживания посредством корректировки рабочих параметров холодильного оборудования с учетом поддержания требуемой толщины.
- Расположение контрольно-термической скважины на внешней границе ледопородного ограждения с учетом допустимого отклонения от заданного направления скважин и неравномерного распространения замороженной зоны определяется по формуле:

$$r_E = R_{3C} + kE_{max} + \alpha_{max3C} + \alpha_{perKT}, \quad (4.15)$$

где R_{3C} — проектный радиус контура замораживающих скважин, м; $k = 0,4$ — установленный опытом коэффициент распространения замороженной зоны от контура замораживающих скважин в направлении от оси шахтного ствола; E_{max} — наибольшее значение требуемой толщины ледопородного ограждения по глубине замораживаемого породного массива, м; α_{max3C} — максимальное отклонение замораживающей скважины от вертикали в направлении от оси шахтного ствола, м; α_{perKT} — допустимое отклонение контрольно-термической скважины от вертикали, м.

- При разработке модели термодинамических процессов, происходящих в условиях искусственного замораживания горных пород, согласно математической

постановке, принятой в разделе 2.1.1, считается, что вокруг контура замораживающих скважин образуется температурное поле, где зона с отрицательной температурой горной породы, в которой вода обращена в лед, называется зоной льда, а остальная зона, в которой температура превышает температуру кристаллизации воды — зоной охлаждения. Таким образом, при решении задачи Стефана теплораспределение в рассматриваемой расчетной области обусловлено теплофизическими параметрами замораживаемой горной породы как в зоне льда, так и в зоне охлаждения, которые напрямую зависят от температуры. В связи с этим, контрольно-термические скважины должны быть расположены не только в пределах ледопородного ограждения, но и за его внешними границами (границами движения фазового перехода). В целях определения температуры горных пород в зоне охлаждения термометрическая скважина, как показывает опыт, должна располагаться от проектной внешней границы ледопородного ограждения на расстоянии не менее чем 3 м, но не более 5 м.

- Для повышения надежности и точности определения температуры во всем объеме участка замораживаемого породного массива, учитывая влияние расположения термометрической скважины на точность решения обратной задачи Стефана установлено, что контрольно-термическую скважину следует размещать на прямой, проходящей посередине между двумя смежными замораживающими скважинами (замковая плоскость), на расстоянии от оси шахтного ствола, равном радиусу контура замораживающих скважин.
- По результатам термометрии контрольных скважин, расположенных в пределах границ ледопородного ограждения возможно производить оценку влияния параметров работы холодильного оборудования на замороженный породный массив, и, в случае необходимости, корректировать их.

На основании результатов проведенных исследований с учетом анализа требуемого количества контрольно-термических скважин и обоснования пространственного разрешения измерений температуры горных пород разработана следующая методика определения оптимальных технологических параметров способа термометрического контроля состояния ледопородных ограждений.

1. По данным инклинометрии пробуренных замораживающих скважин определяется наибольшее расстояние между двумя смежными скважинами по всему контуру их расположения и глубине бурения. Середина наибольшей дуги

окружности между замораживающими скважинами является местом заложения первой контрольно-термической скважины.

2. В соответствии с формулой (4.15) рассчитывается место заложения второй термометрической скважины.
3. Третья контрольно-термическая скважина должна быть расположена на участке замораживания горных пород за пределами ледопородного ограждения на удалении 3-5 м от внешней границы ледопородного ограждения.
4. Контрольно-термические скважины необходимо размещать на максимально возможном расстоянии друг от друга по периметру замораживаемого участка горных пород шахтного ствола.
5. В случае, если проектная документация предусматривает проходку технологического отхода шахтного ствола до достижения ледопородным ограждением проектных параметров во всем интервале замораживания горных пород, требуется заложить четвертую термометрическую скважину на границе с наибольшим значением толщины ледопородного ограждения в интервале проходки технологического отхода согласно формуле (4.15).
6. Пространственное разрешение измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах шахтных стволов определяется на основе данных инженерно-геологических изысканий по формуле (4.14).

Таким образом, для выполнения надежного и точного прогноза состояния ледопородного ограждения требуется и достаточно трех контрольно-термических скважин на участке замораживания строящегося шахтного ствола. На рисунке 4.15 приведено схематичное представление мест заложения термометрических скважин, необходимых для контроля теплового поля замораживаемого породного массива.



Рисунок 4.15 — Схематичное представление мест заложения контрольно-термических скважин

При необходимости получения дополнительной информации о температуре породного массива целесообразность расположения дополнительных контрольно-термических скважин обосновывается проектом замораживания горных пород.

4.6. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на обоснование технологических параметров термометрического контроля ледопородного ограждения, можно сделать следующие выводы:

- на основании статистической обработки экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах установлены закономерности влияния процесса искусственного замораживания на локальные участки породного массива;
- для получения решения обратной задачи Стефана с максимальной точностью определено, что термометрическую скважину следует располагать в точке с наименьшей температурой, на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами (в замковой плоскости);
- для того, чтобы обеспечить всесторонний контроль состояния ледопородного ограждения, количество контрольно-термических скважин должно быть не менее 30 % от общего количества замораживающих скважин;

- проведено обоснование оптимального расположения и количества контрольно-термических скважин, необходимых для выполнения термометрического мониторинга состояния ледопородного ограждения на участке замораживания породного массива;
- при мощности укрупненной литологической разности равной двум метрам и необходимости проведения в ней трех замеров температуры пространственное разрешение измерений распределенной температуры горных пород должно быть не менее 1 метра.

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО И ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

При строительстве шахтных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях способом искусственного замораживания в целях повышения качества прогнозирования термодинамических процессов, происходящих в обводненном массиве горных пород, и безопасности ведения горных работ предусматривается использование автоматизированной системы непрерывного и оперативного контроля состояния ледопородного ограждения, которая представлена в главе 3.

Архитектура системы контроля включает множество различных компонентов, таких как измерительное, серверное и клиентское оборудование, база данных, математическая модель и совокупность численных методов расчета. При этом надежность и точность определения теплового поля во всем объеме участка породного массива в условиях замораживания обусловлена техническими характеристиками оборудования и методами научного познания, применяемыми для прогнозирования параметров ледопородного ограждения вокруг строящегося шахтного ствола. В связи с этим для получения достоверных результатов о состоянии ледопородного ограждения необходимо установить требования к параметрам технических средств и разработке математической модели теплообменных процессов, происходящих в замораживаемом массиве горных пород, а также к численным методам их расчета.

Кроме того, для обработки экспериментальных данных, калибровки расчетных параметров модели, выполнения прогноза и визуализации теплораспределения в породном массиве требуется разработка специализированного программного обеспечения, которое позволит повысить качество контроля состояния ледопородного ограждения шахтных стволов, строящихся в сложных геологических и гидрогеологических условиях.

5.1. Требования к параметрам системы термометрического контроля

Система непрерывного и оперативного контроля состояния ледопородного ограждения включает оптоволоконный кабель, размещаемый в контрольно-термических скважинах; волоконно-оптический регистратор (интеррогатор), предназначенный для определения распределения температуры замораживаемого породного массива; сервер сбора и хранения данных, устанавливаемый на строительной площадке шахтных

стволов; клиентское рабочее место со специализированным программным обеспечением для обработки данных (раздел 5.3).

Качество контроля состояния ледопородного ограждения напрямую зависит от используемых компонентов системы термометрического контроля. Технические параметры компонентов должны быть адаптированы и устойчивы к условиям внешней среды, а также обладать высокой надежностью. В связи с этим к параметрам системы термометрического контроля предъявляется следующий ряд требований.

1. Оптоволоконный измерительный кабель должен монтироваться в каждой контрольно-термической скважине шахтного ствола на полную глубину, быть с двухповивным проволочным бронированием и наружной защитной оболочкой, выполненной из нержавеющей стали, а также состоять не менее чем из двух многомодовых оптических волокон с размерами сердечника 50 мкм и его оптической оболочкой 125 мкм.
2. Волоконно-оптический регистратор, при помощи которого непрерывно обрабатываются и интерпретируются внутримолекулярные колебания решетки оптоволокна, должен иметь не менее двух измерительных каналов на строящийся шахтный ствол, обеспечивать пространственное разрешение измерений по глубине контрольно-термической скважины не более 1 м с точностью не менее 0,1 °С и минимальным диапазоном измерения температур от -50 °С до +50 °С.
3. Получаемые на основании интерпретации данные о распределении температур горных пород в режиме реального времени следует передавать на сервер, где должна быть установлена математическая модель термодинамических процессов, разработанная в соответствии с требованиями, подробно представленными в разделе 5.2.2.
4. На клиентском рабочем месте при помощи специализированного программного обеспечения должен выполняться ежесуточный контроль, а также, при необходимости, прогноз состояния ледопородного ограждения.
5. Сервер хранения и клиентское рабочее место должны быть реализованы на отдельных персональных компьютерах и установлены в операторной замораживающей станции шахтного ствола. Сервер должен предусматривать подключение к волоконно-оптическому регистратору, автоматизированному рабочему месту замораживающей станции и клиентскому рабочему месту по сети Ethernet.

Необходимо отметить, что в целях повышения надежности и точности определения температуры горных пород, требования предъявляются также к

конструкции, количеству и расположению контрольно-термических скважин (раздел 4.5). Кроме этого, в проекте замораживания горных пород устанавливаются требования к выполнению монтажных и пусконаладочных работ, а также организации обработки и управления данными системы термометрического контроля ледопородного ограждения.

5.2. Методика построения математической модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве

Математическая модель и методы расчета термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве, должны соответствовать реальным инженерно-техническим и геологическим условиям, учитывающим естественный теплоприток со стороны незамороженных пород и влияние технологических факторов, к которым относятся теплообмен с поступающим в ствол воздухом, гидратация бетона при возведении передовой крепи, термодинамическое сопротивление колонок и другие.

Для выполнения расчетов и прогноза состояния ледопородного ограждения требуется большинство параметров исходной математической модели, отвечающих за распределение нестационарного теплового поля в замораживаемом массиве пород. Таким образом, достоверность получаемых результатов в наибольшей степени определяется корректностью и полнотой используемых для расчета исходных данных.

5.2.1. Исходные данные для математического моделирования

Для построения корректной математической модели, проведения инженерных расчетов и интерпретации результатов необходимо иметь следующие исходные данные:

- данные инженерно-геологических исследований участка строительства шахтного ствола, включая геологический разрез по его оси и характеристику залегания пород; данные термометрии для определения естественной температуры горных пород; отчет о бурении контрольно-стволовых скважин, включая геологические колонки;
- отчет о гидрогеологических исследованиях, содержащий журналы скважин и листы откачек с указанием пьезометрических (статических) уровней подземных вод, для каждого водоносного горизонта; абсолютные отметки кровли и подошвы водоносных горизонтов, а также водоупора; сведения о скоростях фильтрации и направлениях движения подземных вод, коэффициенты фильтрации и ожидаемые притоки в шахтный ствол, гидрогеологический разрез через ось ствола; сведения о химическом составе подземных вод, сведения о температуре замерзания сильно

минерализованных рассолов, если таковые имеются в наличии в пределах участка строительства ствола;

- отчет об определении в лабораторных условиях физических и теплофизических свойств образцов пород участка строительства шахтного ствола, содержащий данные о коэффициенте теплопроводности и удельной теплоемкости образцов пород, исследованных при положительных и отрицательных температурах; о естественном влагосодержании образцов пород при положительной температуре; о влагосодержании образцов пород при различных отрицательных температурах: - 0,5 °С, -1 °С, -2 °С, -3 °С, -5 °С, -10 °С, -15 °С, -20 °С (при наличии в породе сильноминерализованного рассола необходимы данные исследований при температурах ниже -20 °С вплоть до температуры полного замерзания рассола); о температуре начала кристаллизации воды и температуре начала плавления льда в образцах пород; о плотности и о коэффициенте пористости пород;
- проект на замораживание горных пород с расчетом требуемых толщин ледопородного ограждения по всей глубине замораживания, с учетом температуры прочной породы, для которой определена проектная толщина;
- проект организации строительства шахтного ствола с параметрами его сечений в проходке и в свету, с указанием абсолютной отметки буровой плиты либо другой отметки, принятой за нулевую глубину, с указанием абсолютной отметки пола замораживающей галереи, с данными о креплении и гидроизоляции ствола;
- сведения о толщине передовой бетонной крепи и характеристиках применяемого бетона: плотности, удельной теплопроводности и теплоемкости, пористости бетона;
- план-график строительства ствола (до начала замораживания) и ежесуточные данные о фактической отметке забоя в процессе его проходки;
- журналы (паспорта) бурения и схемы конструкции замораживающих и контрольно-термических скважин;
- маркшейдерские данные (координаты и абсолютные отметки) и данные инклинометрии замораживающих и контрольно-термических скважин;
- данные ультразвукового контроля ледопородного ограждения и других методов, если таковые проводились для определения наличия пустот в пространстве между кондуктором и замораживающей колонкой, то есть, данные о наличии и глубине пустот, в случае заполнения пустот — схема их ликвидации с указанием типа заполнителя (вода, буровой раствор, сухой песок и т.д.);

- данные о применяемом хладоносителе (рассоле), циркулирующем в замораживающих колонках: тип хладоносителя, концентрация, плотность, удельная теплопроводность и теплоемкость, вязкость рассола;
- график замораживания с момента запуска в работу замораживающего комплекса, включающий ежесуточные данные о температуре прямого потока хладоносителя, температуре и расходе обратного потока хладоносителя с датчиков на оголовках замораживающих скважин;
- данные о работе калориферных установок и вентилятора, нагнетающего воздух в ствол; о температуре воздуха и его расходе на выходе из вентиляционного трубопровода.

Перед разработкой модели необходимо произвести аудит имеющихся исходных данных, проверить их полноту и оценить достоверность, потому что низкое качество или частичное отсутствие данных снижают надежность прогнозных расчетов параметров состояния ледопородного ограждения шахтных стволов.

5.2.2. Требования к математической модели и численным методам расчета

Математическая модель теплообменных процессов в замораживаемом многослойном обводненном массиве горных пород должна учитывать следующие важные процессы и факторы:

- кондуктивный перенос теплоты в зонах охлаждения и льда породного массива в горизонтальном направлении за счет механизма диффузии;
- нестационарность теплопереноса в зонах охлаждения и льда породного массива во времени;
- различие в теплофизических свойствах породного массива в зонах охлаждения и льда, обусловленное фазовым переходом (замерзанием) подземных вод;
- выделение скрытой теплоты фазового перехода при кристаллизации подземных вод;
- теплообмен с каждой замораживающей колонкой, определяемый коэффициентом теплоотдачи от хладоносителя к породному массиву, температурами хладоносителя и породного массива;
- отклонения от вертикали замораживающих и контрольных скважин, рассчитанные по данным инклинометрии;
- теплообмен с крепью и воздухом, подаваемым для проветривания шахтного ствола на этапе его проходки, в том числе, выделение скрытой теплоты фазового перехода при твердении бетона при возведении крепи ствола;

- теплопритоки через внешнюю границу расчетной области.

При разработке математической модели термодинамических процессов, происходящих в условиях искусственного замораживания породного массива, в целях сокращения времени вычислений допускаются следующие упрощения:

- однородность и изотропность теплофизических свойств породного массива в зонах охлаждения и льда (теплоемкость, теплопроводность, начальная температура, влагосодержание);
- отсутствие вертикального переноса теплоты в породном массиве;
- отсутствие конвективного переноса теплоты, вызванного движением подземных вод (справедливо для скоростей фильтрации подземных вод до 10 мм/сут).

Численный метод расчета теплообменных процессов в замораживаемом обводненном массиве горных пород выбирается с учетом следующего:

- при численном расчете теплообмена в обводненной горной породе допускается использование как метода конечных разностей на регулярной неоднородной сетке, так и метода конечных элементов или метода конечных объемов на нерегулярной неоднородной сетке;
- сгущение сетки вблизи замораживающих колонок должно быть достаточным для того, чтобы исключить влияние размера элемента на получаемое поле температур;
- расчетный домен, используемый при численном расчете теплообменных процессов в массиве, должен быть взят достаточно большим, чтобы исключить возможность влияния граничных условий, заданных на внешней границе, на получаемое поле температур;
- для моделирования динамики границы фазового перехода должен использоваться энтальпийный подход;
- при использовании энтальпийного подхода используется неявная схема по времени. При этом величину шага по времени следует выбирать и предварительно калибровать так, чтобы получаемое поле температур не зависело от шага по времени;
- порядок точности численного метода по пространству нужно брать не менее чем квадрат шага по пространству, по времени — не менее чем порядок шага по времени;
- при расчете нестационарного поля температур в узлах расчетной сетки не должно возникать осциллирующих решений. Также при расчете в любой момент времени и в любом из узлов сетки температура слоя породного массива должна удовлетворять условию:

$$T_{min} < T(\vec{r}, t) < T_{max}, \quad (5.1)$$

где T_{min} — минимальное значение температуры циркулирующего в замораживающих колонках хладоносителя, °С; T_{max} — максимальное значение температуры, равное значению температуры непо потревоженного массива для рассматриваемого слоя горной породы до начала его замораживания (в случае наличия ствола максимальная температура может быть равна температуре воздуха, подаваемого для проветривания ствола).

5.3. Разработка программного обеспечения для прогноза параметров состояния ледопородного ограждения

В процессе выполнения термометрического мониторинга состояния участка замораживаемого породного массива требуется непрерывно выполнять обработку и интерпретацию экспериментальных измерений температуры горных пород, осуществлять сбор данных о параметрах работы замораживающей станции шахтных стволов, производить численное моделирование с учетом влияния различных технологических факторов, а также формировать ежесуточные отчеты, содержащие температурные поля, фактический график замораживания и прогнозируемые параметры ледопородного ограждения. В связи с этим разработано специализированное программное обеспечение «FrozenWall» [83], предназначенное для осуществления непрерывного и оперативного контроля параметров состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов на основе интеграции данных термометрии контрольных скважин с методом решения обратной задачи Стефана.

Программа «FrozenWall» имеет специализированные графические и расчетные инструменты для решения производственных и научных задач в рамках прогнозирования термодинамических процессов, происходящих в породном массиве в условиях его замораживания. Программа обладает следующими функциональными возможностями:

- построение слоистой геологической модели участка породного массива;
- обработка данных экспериментальных измерений распределения температуры горных пород по глубине контрольно-термической скважины;
- калибровка расчетных параметров на основании термометрии контрольных скважин;
- расчет и визуализация теплораспределения в замораживаемом породном массиве;
- создание ежесуточных отчетов о параметрах формирования и состояния ледопородного ограждения.

На рисунке 5.1 представлено главное окно программного обеспечения «FrozenWall» с тематическими вкладками, содержащими различные команды. Вкладка *Исходные данные* включает в себя команды, предназначенные для формирования расчетных исходных данных в готовые таблицы, *Расчет* — для выполнения расчетов и проведения калибровки расчетных параметров, *Анализ результатов* — для визуализации термодинамических процессов и составления отчета о состоянии ледопородного ограждения.

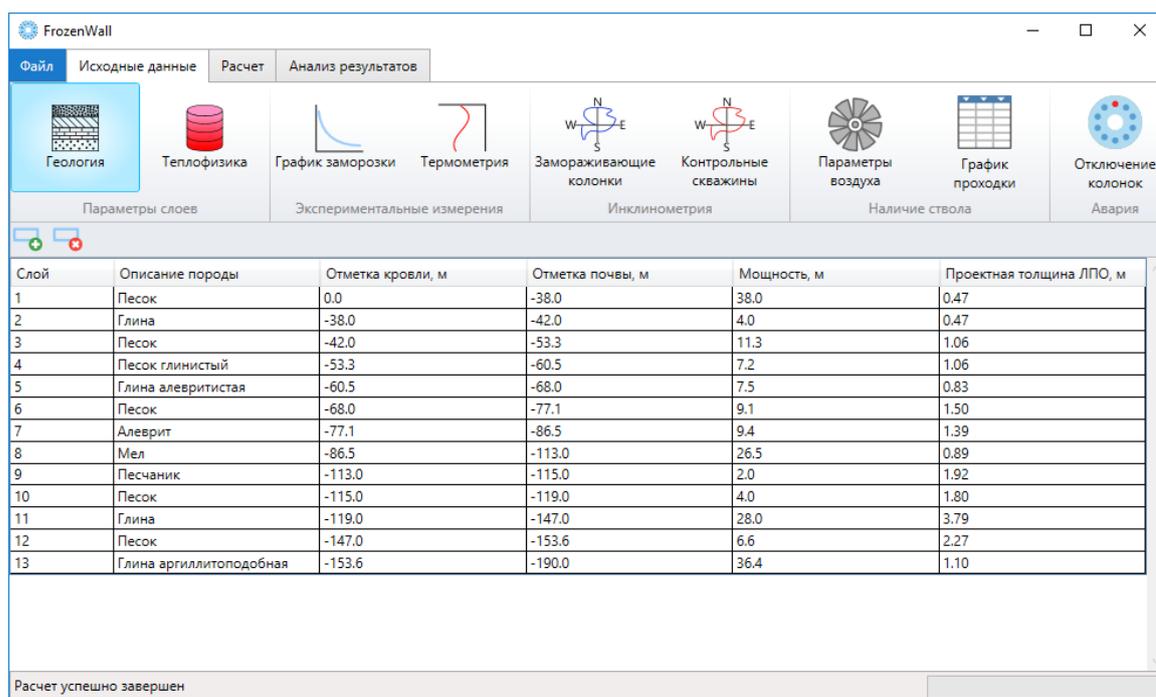


Рисунок 5.1 — Главное окно программного обеспечения «FrozenWall»

Создание программного обеспечения и установочных пакетов выполнялось с помощью среды разработки Microsoft Visual Studio. Для клиентской части и выделенного сервера баз данных программы «FrozenWall» используются следующие операционные системы: Microsoft Windows XP/7/8/10, Windows Server 2012/2016.

5.3.1. Исходные данные

Исходными данными для расчета теплового поля замораживаемого породного массива являются физические свойства горных пород, инклинометрия скважин, график замораживания, включающий данные о температуре хладоносителя и его объемном расходе, параметры воздуха, поступающего на проветривания горных работ, фактическая отметка забоя и другие. Данные заносятся в программу путем заполнения таблиц во вкладке *Исходные данные*.

Все основные расчетные параметры задаются в специальном окне, открываемом при помощи команды *Расчетные параметры* в *Главном меню* — *Файл*. Эти параметры сгруппированы по следующим вкладкам: *Параметры бетона*, *Параметры хладоносителя*, *Параметры колонок*, *Параметры ствола*, *Прочие параметры*. Окно задания расчетных параметров представлено на рисунке 5.2.

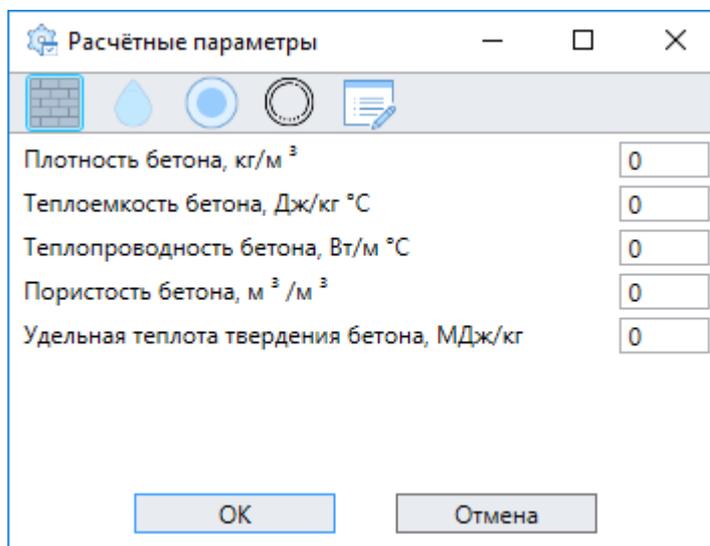


Рисунок 5.2 — Окно задания расчетных параметров

Исходные и расчетные данные можно сохранить в формате .xlsx (Microsoft Excel) в целях последующей загрузки и редактирования.

К входным данным, которые используются для калибровки теплофизических параметров математической модели, относятся сведения об экспериментальных измерениях температуры горных пород в контрольно-термических скважинах шахтных стволов, полученные при помощи волоконно-оптического регистратора.

5.3.2. Расчет

Проведение расчетов теплораспределения в замораживаемом породном массиве выполняется посредством численного решения прямой задачи теплопроводности с движущейся границей фазового перехода (прямой задачи Стефана) с учетом уточненных изначально заданных теплофизических свойств горных пород. Базовые принципы расчета температурного поля приведены в разделе 2.1.1. Численное решение прямой задачи Стефана осуществляется с помощью метода конечных разностей. Вблизи границы с замораживающими колонками задается сгущение конечно-разностной сетки для корректного моделирования высоких градиентов температуры в начальный период замораживания, а также при изменении режимов работы замораживающих колонок.

Калибровка исходных теплофизических параметров математической модели массо- и теплообменных процессов, происходящих в обводненной массиве горных пород, основана на методе решения коэффициентной обратной задачи Стефана, который подробно описан в разделе 2.1.4.

Расчет теплораспределения и калибровка теплофизических параметров модели осуществляются при помощи вкладки *Расчет*, которая представлена на рисунке 5.3.

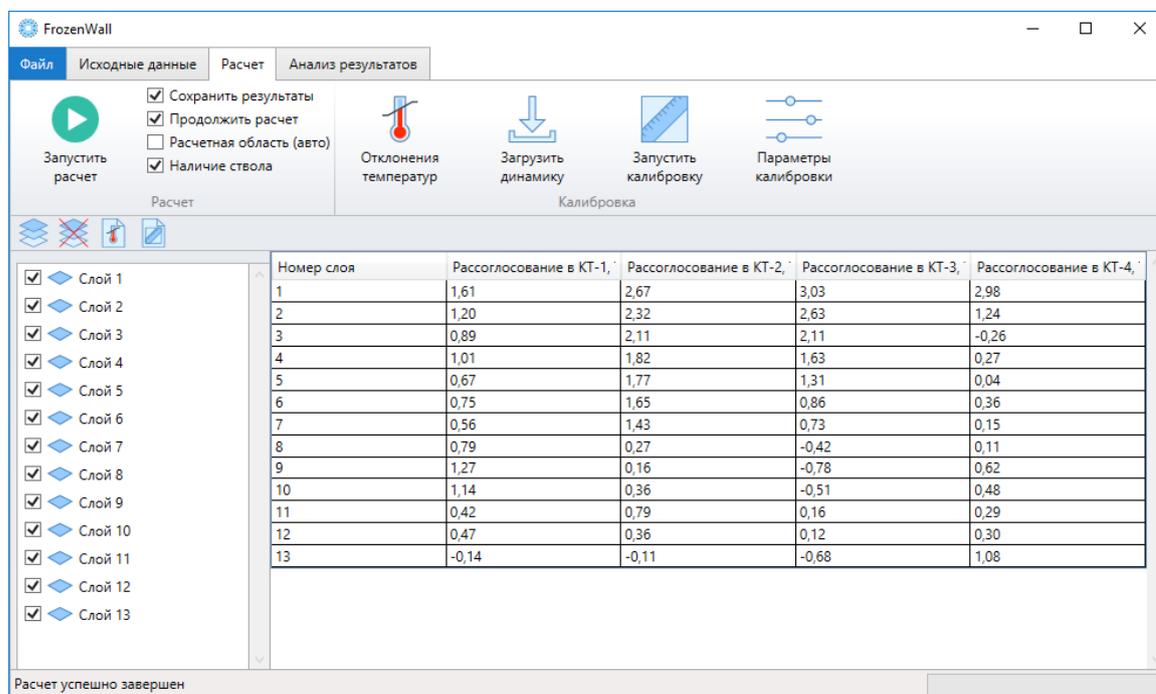


Рисунок 5.3 — Вкладка *Расчет* программы «FrozenWall»

Кроме определения теплового режима породного массива в условиях его искусственного замораживания в программе «FrozenWall» предусмотрен учет дополнительных физических процессов, влияющих на состояние параметров ледопородного ограждения.

1. Теплообмен горных пород с воздухом с учетом суточных и сезонных температурных колебаний.
2. Влияние экзотермической реакции твердения бетона при возведении крепи.
3. Выход из строя замораживающих колонок.

Учет теплообмена горных пород с воздухом

В программном обеспечении реализована возможность задания переменных во времени температуры и скорости воздуха, поступающего для проветривания шахтного ствола в процессе его проходки. Зависимости температуры и скорости от времени задаются в табличном виде как дискретный набор точек. Значения для промежуточных значений времени получают посредством линейной интерполяции.

При расчете теплообмена между породным массивом, крепью ствола и поступающим на проветривание атмосферным воздухом, с учетом суточных и сезонных температурных колебаний, тепловой поток рассчитывается согласно закону Ньютона:

$$q = \alpha(V_a(t))(T_a(t) - T_m), \quad (5.2)$$

где q — тепловой поток на единице поверхности, Вт/м²; α — коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости V_a движения воздуха в стволе, Вт/(м²·°С); T_a — температура воздуха в стволе, °С; T_m — температура породного массива (крепя) на границе с замораживающей колонкой, °С.

Влияние экзотермической реакция твердения бетона при возведении крепи

В момент времени, когда в исследуемом слое горных пород шахтный ствол считается пройденным, на границе породного массива со стенками шахтного ствола задается отдельная зона (бетонная крепь) со своими теплофизическими свойствами. В момент появления шахтного ствола и, соответственно, передовой бетонной крепи на последней задается равномерно распределенный мгновенный источник тепловыделения. Суммарная выделившаяся теплота рассчитывается, исходя из толщины h_l бетонной крепи для рассматриваемого слоя горных пород и удельной теплоты фазового перехода L_c твердения на 1 кг бетона. Считается, что после затвердевания бетона в нем не остается влаги.

Уравнение теплопереноса для бетонной крепи имеет следующий вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \Delta T_m + \delta(t - t_{ss}) \cdot \rho_c L_c, \quad (5.3)$$

где ρ — плотность бетона, кг/м³; L_c — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; H — удельная энтальпия, Дж/м³; t — время, с; λ — теплопроводность бетона, Вт/(м·°С); T_m — температура породного массива (бетонной крепи), °С; δ — дельта-функция Дирака; t_{ss} — момент проходки ствола, с.

Учет термического сопротивления замораживающих скважин

Если в межтрубном пространстве между замораживающей колонкой и кондуктором имеются пустоты, которые обусловлены некачественным производством тампонажных работ, то термическое сопротивление некоторых замораживающих скважин значительно возрастает, вследствие чего замораживание слоев горных пород происходит крайне неравномерно. Для этого случая в программе предусмотрено задание термического сопротивления для каждой замораживающей скважины. Термическое сопротивление R при идеально прямых центрированных кондукторе и колонке рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{D_k - 2d_k}{D_{зк}}, \quad (5.4)$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха при отрицательной температуре, Вт/(м·°С); D_k и $D_{зк}$ — диаметры труб кондуктора и замораживающей колонки по внешней стенке, м; d_k — толщина стенки трубы кондуктора, м; l — длина участка трубы, м.

Выход из строя замораживающих колонок

Реализована возможность моделирования процесса замораживания с учетом изменения режима работы выборочного набора замораживающих колонок или аварийного выхода их из строя. Для этого для каждой из замораживающих колонок введена функция состояния $S(t)$, принимающая значение 1 в те моменты времени, когда колонка работает в штатном режиме, и значение 0 в случае ее аварийного отключения или неисправности. Также функция S может принимать промежуточные значения от 0 до 1, что соответствует случаю частичной неисправности или сниженной холодильной мощности на данной колонке.

Граничное условие теплообмена на стенке замораживающей колонки преобразовано к виду:

$$q_i = S_i(t) a_b(V_b(t))(T_b(t) - T_m), \quad (5.5)$$

где $S_i(t)$ — функция состояния замораживающей колонки № i ; q_i — тепловой поток на единице поверхности, Вт/м²; a_b — коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости V_b движения хладоносителя в колонке, Вт/(м²·°С); T_b — температура хладоносителя, °С; T_m — температура породного массива на границе с замораживающей колонкой, °С.

Таким образом, разработанное программное обеспечение «FrozenWall» позволяет не только рассчитывать фактическое состояние ледопородного ограждения, но и на основании прогнозирования его параметров с учетом влияния технологических факторов и возникновения аварийных ситуаций, разрабатывать технические мероприятия, направленные на обеспечение эффективности строительства шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

5.3.3. Вывод результатов

На основании моделирования производится анализ результатов и подготовка отчета о состоянии ледопородного ограждения строящегося шахтного ствола. Вкладка *Анализ результатов* представлена на рисунке 5.4.

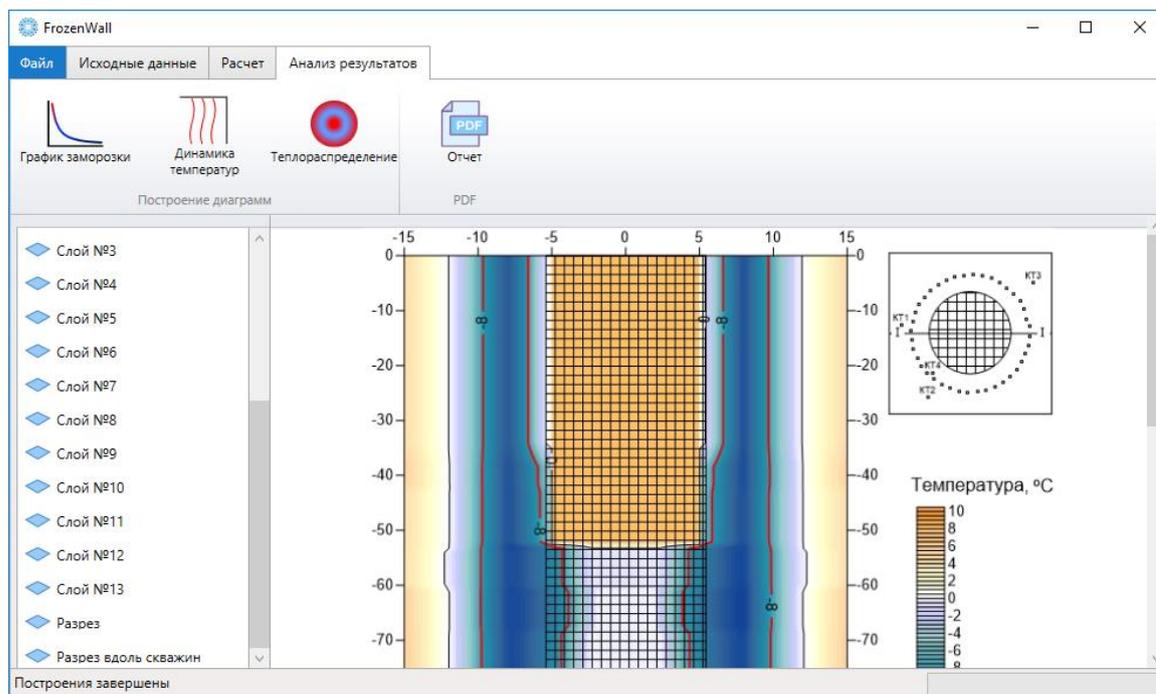


Рисунок 5.4 — Вкладка *Анализ результатов* программы «FrozenWall»

Выводится следующая информация, отображающая состояние ледопородного ограждения:

- графики температуры прямого и обратного потока хладоносителя, циркулирующего в замораживающих скважинах, и его объемный расход в рассольной сети за весь период, включая текущую дату;
- графики среднесуточных температур в каждой контрольно-термической скважине с отметками глубин, наложенные на укрупненную литологию модели;
- карты распределения температур в горизонтальной плоскости для каждого слоя модели в изолиниях с раскраской;
- карта распределения температур в изолиниях с раскраской в вертикальном сечении через область ледопородного ограждения с нанесением контура ствола в проходке;
- карта распределения температур в изолиниях с раскраской в главной вертикальной плоскости, проходящей через контур замораживающих колонок;
- фактическая толщина ледопородного ограждения на текущие и предыдущие сутки.

Созданные ежесуточные отчеты о параметрах формирования и состояния ледопородного ограждения предоставляются специалистам предприятий, занимающихся непосредственно строительством шахтных стволов.

5.4. Повышение качества контроля состояния ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов рудников Талицкого ГОК

Разработанная автоматизированная система термометрического мониторинга состояния ледопородного ограждения шахтных стволов внедрена и адаптирована на руднике Талицкого ГОК, разрабатывающем Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей.

Для формирования и поддержания ледопородного ограждения шахтного ствола № 2 Талицкого ГОК используются 45 замораживающих скважин, пробуренных до глубины 229 метров. Расположение замораживающих и контрольно-термических скважин представлено на рисунке 4.1. Замораживание пород осуществляется хладоносителем — водным раствором CaCl_2 с плотностью $1,28 \text{ г/см}^3$, содержанием соли 29,4 % и температурой замерзания $-50,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Рабочая температура замораживания породного массива — $-38 \text{ }^\circ\text{C}$. Для охлаждения хладоносителя используется замораживающая станция, мощность которой составляет 3,36 МВт (по 1 680 кВт на каждый ствол). В качестве хладагента замораживающей станции используется фреон R507.

При проходке технологического отхода шахтного ствола № 2 на отметке $-19,0 \text{ м}$ на 133 сутки после начала замораживания горных пород на стенках ствола в его северо-западной части были обнаружены незначительные водопроявления. При дальнейшей проходке ствола на отметке $-20,3 \text{ м}$ наблюдался стабильный водоприток со средним дебитом $7-8 \text{ м}^3/\text{сут}$. Следует отметить, что на основании численного моделирования с учетом данных термометрии имеющихся контрольных скважин, ледопородное ограждение в интервале сооружения технологического отхода на 133 сутки достигло требуемой толщины и обладало сплошностью. Однако на основании проведенных натуральных измерений в шахтном стволе и анализа результатов ультразвукового обследования участка породного массива шахтного ствола № 2 установлено, что причиной возникновения водопроявлений являлось наличие гидравлического «окна», образованного за счет высокого термического сопротивления конструкции замораживающих скважин. В результате было выявлено, что в верхней части замораживающих скважин, преимущественно до глубины 80 метров, в межтрубном пространстве между замораживающей колонкой и кондуктором имеются пустоты, которые обусловлены некачественным производством тампонажных работ.

При наличии воздушной прослойки между колонкой и кондуктором термическое сопротивление замораживающих скважин значительно возрастает, вследствие чего замораживание верхних слоев горных пород происходит крайне неравномерно. Но

используемая для расчетов математическая модель основана на изотропности физических характеристик массива и способна отражать параметры ледопородного ограждения по всему контуру, исходя из аналогии его состояния напротив контрольно-термических скважин. В данном случае имела место анизотропия распространения поля температур, что объясняется различным термическим сопротивлением конструкции замораживающих скважин.

Таким образом, учитывая термическое сопротивление замораживающих скважин, результаты исследования влияния отдельных замораживающих колонок на распределение температурных полей с учетом их нормальной и аварийной работы, которое подробно описано в разделе 4.2, а также расположение со стороны водопритока только одной контрольно-термической скважины, выполнено многовариантное численное моделирование. Расчеты производились с учетом откалиброванных на основании термометрии скважин теплофизических параметров модели слоя горной породы, расположенной на отметке -20,3 м. При этом показания оптоволоконной системы термометрического контроля и результаты математического моделирования были верифицированы при проведении измерений температуры в контрольно-термических скважинах локальным высокоточным термодатчиком и тепловизионной съемки породных стенок шахтного ствола соответственно.

Отмечается, что термическое сопротивление замораживающей скважины вычислено как сумма термических сопротивлений всех составляющих многослойной цилиндрической конструкции, при этом преобладающим по величине является именно термическое сопротивление заполнителя в межтрубном пространстве. Термическое сопротивление теплопроводности воздушной прослойки при идеально прямых центрированных кондукторе и колонке рассчитывается по формуле (5.4):

Результаты моделирования представлены на рисунке 5.5.

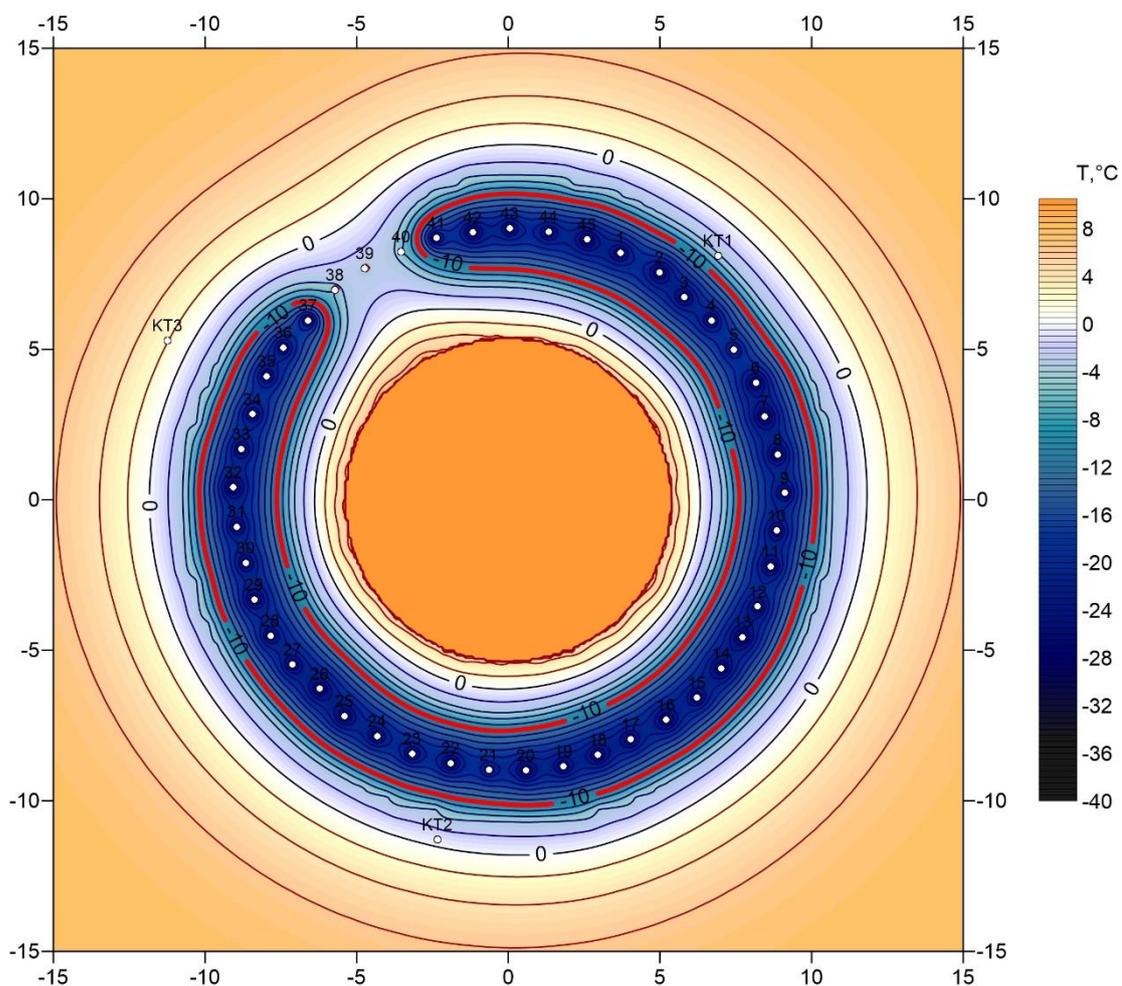


Рисунок 5.5 — Наличие гидравлического «окна» на удалении от контрольно-термических скважин с учетом термического сопротивления трех соседних замораживающих скважин

Из рисунка 5.5 видно, что при наличии воздушной прослойки у трех и более соседних замораживающих скважин в ледопородном ограждении образуется гидравлическое «окно» с температурой горной породы от 0 °С до -2 °С. При этом, если колонки с высоким термическим сопротивлением располагаются на удалении от контрольно-термических скважин, оптоволоконная система термометрического мониторинга не зафиксирует незначительные изменения температуры (в пределах +0,5 °С).

В результате выполненной оценки наиболее неблагоприятного варианта, при котором термическое сопротивление замораживающих скважин является максимально возможным, вследствие наличия воздушной прослойки в межтрубном пространстве, установлено, что для обеспечения безопасности ведения горных работ в интервале проходки технологического отхода ствола № 2 Талицкого ГОК, и следовательно, ликвидации водопроявлений в нем, необходимо продлить сроки замораживания на 180 суток в целях достижения требуемых параметров ледопородного ограждения.

Кроме этого, проведены расчеты с учетом снижения термического сопротивления конструкции замораживающих скважин в случае заполнения межтрубного пространства дистиллированной водой. Для сравнения, при наличии воздуха с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{в}} = 0,024 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{С})$, термическое сопротивление воздушной прослойки толщиной 5 см составляет $R = 2,82 \text{ }^{\circ}\text{С}/\text{Вт}$, а при заполнении прослойки водой и ее переходе в лед с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{л}} = 2,30 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{С})$, термическое сопротивление составит $R = 0,03 \text{ }^{\circ}\text{С}/\text{Вт}$. Результаты моделирования показали, что при снижении термического сопротивления требуемые параметры ледопородного ограждения в интервале сооружения технологического отхода будут достигнуты через 25 суток замораживания, что в 7 раз быстрее, чем при отсутствии заполнителя в межтрубном пространстве замораживающих скважин.

Таким образом, автоматизированная система термометрического контроля замораживаемого породного массива вокруг строящихся шахтных стволов позволяет не только определять фактические параметры ледопородного ограждения, но и разрабатывать технически обоснованные мероприятия, направленные на обеспечение безопасности ведения горных работ и повышение показателей эффективности строительства шахтных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях.

5.5. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на разработку технологического и методического обеспечения построения системы непрерывного и оперативного контроля состояния ледопородных ограждений, можно сделать следующие выводы:

- установлены минимальные требования к параметрам технических средств системы контроля и разработке математической модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом массиве горных пород, а также к численным методам их расчета для получения достоверных результатов о состоянии ледопородного ограждения;
- для обработки экспериментальных данных, калибровки расчетных параметров модели, выполнения прогноза и визуализации теплораспределения в породном массиве разработано специализированное программное обеспечение;
- программа «FrozenWall» позволяет учитывать дополнительные физические процессы, влияющие на состояние параметров ледопородного ограждения при строительстве шахтного ствола, такие как теплообмен атмосферного воздуха с

обнаженными горными породами, гидратация бетона при возведении крепи ствола, термическое сопротивление скважин, выход из строя замораживающих колонок, тем самым повышая качество контроля;

- на базе автоматизированной системы термометрического контроля замораживаемых участков породного массива вокруг строящихся шахтных стволов возможно разрабатывать технически обоснованные мероприятия, направленные на обеспечение безопасности ведения горных работ и повышение показателей эффективности строительства шахтных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи разработки автоматизированной системы термометрического контроля и прогнозирования состояния ледопородных ограждений в целях предотвращения возникновения аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов способом искусственного замораживания горных пород и получены следующие основные научные результаты.

1. Разработан метод решения обратной задачи Стефана на основе использования данных о температуре горных пород в ограниченном количестве контрольно-термических скважин строящихся шахтных стволов.
2. Выполнена верификация экспериментальных измерений распределенной температуры горных пород и результатов моделирования термодинамических процессов, происходящих в условиях искусственного замораживания, на примере строящегося Скипового ствола № 1 ИООО «Славкалий».
3. Разработана автоматизированная система термометрического контроля состояния ледопородных ограждений, позволяющая непрерывно и оперативно определять температуру во всем замораживаемом породном массиве.
4. Проведено исследование и обоснование технологических параметров способа термометрического контроля формирования и состояния ледопородного ограждения.
5. Определены требования к параметрам технических средств и разработке математической модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом массиве горных пород, а также к численным методам их расчета в целях получения достоверных результатов о состоянии ледопородного ограждения.
6. Разработано специализированное программное обеспечение для выполнения контроля ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов, позволяющее прогнозировать его параметры с учетом влияния различных технологических факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аксельрод С.М. Оптико-волоконная технология при геофизических исследованиях в скважинах. — Каротажник. 2006. № 1 (142). — с. 184 — 204.
2. Акустический способ контроля качества ледопородных ограждений при сооружении подземных объектов. Насонов И.Д., Тютюнник П.М., Коновалихин В.Е.; заявитель МГИ. — авторское свидетельство СССР № 476502, опубликовано 05.07.1975. — 5 с.
3. Акустический способ контроля качества и процесса формирования ледопородных ограждений при сооружении подземных объектов. Новиков Е.А., Шкуратник В.Л., Ошкин Р.О., Кормнов А.А.; патентообладатель МИСиС. — патент № 2581188, опубликовано 20.04.2016. — 6 с.
4. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. — М.: Машиностроение. 1988. — 280 с.
5. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. — М.: Янус-К. 2009. — 297 с.
6. Альбрехт Т., Шильдер Р. Буровые работы для проходимых способом замораживания стволов в России – Усть-Яйвинский рудник. — Mining Report 149. 2013. № 2. — с. 80 — 87.
7. Амосов П.В., Лукичев С.В., Наговицын О.В. Влияние пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения. — Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 4 (27). — с. 43 — 50.
8. Анализ и обобщение результатов. Выявление закономерностей вариации теплофизических и прочностно-деформационных характеристик горных пород в вертикальном и горизонтальном направлениях на участке Петриковского горно-обогатительного комплекса. — Отчет о НИР № 58-12. Этап 30.2.6. — Минск. ОАО «Белгорхимпром». 2013. — 230 с.
9. Архипов А.Г. Искусственное замораживание грунтов и контроль сплошности ледогрунтовых ограждений методом межскважинного акустического просвечивания (прозвучивания). — [Офиц. сайт]. URL: <https://geodiagnosics.ru/ControlLGO.htm> (дата обращения: 07.02.2019).
10. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. Некорректные обратные задачи теплопроводности. — М.: Мир. 1989. — 303 с.

11. Бородин С.Л. Численные методы решения задачи Стефана. — Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1. № 3. — с. 164 — 175.
12. Бельферман М.У. Оптимальное проектирование технологии замораживания пород при проходке вертикальных стволов шахт: дис. ... канд. техн. наук — Тула. 1984. — 375 с.
13. Бельферман М.У. Температурное поле ледопородного ограждения шахтных стволов при двухрядном расположении замораживающих колонок. В кн.: Вопросы организации и механизации горнопроходческих работ. — М.: ИГД им. А.А. Скочинского. 1976. — с. 109 — 116.
14. Будаков Б.М., Соловьева Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана — Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1965. Т. 5. № 5. — с. 828 — 840.
15. Вабищевич П.Н., Васильева М.В., Павлова Н.В. Численное моделирование термостабилизации фильтрующих грунтов. — Матем. моделирование. 2014. Т. 26. № 9 — с. 111 — 125.
16. Вабищевич П.Н., Васильева М.В., Горнов В.Ф., Павлова Н.В. Математическое моделирование искусственного замораживания грунтов. — Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 4 — с. 19 — 31.
17. Вакуленко И.С., Николаев П.В. Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. — с. 338 — 346.
18. Варганов А.З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. — М.: Стройтехиздат. 2013. — 548 с.
19. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. — М.: Факториал Пресс. 2002. — 824 с.
20. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Т. 1. Математические модели. — Донецк: Норд-Пресс. 2008. — 632 с.
21. Вознесенский А.С. Системы контроля геомеханических процессов. — М.: МГГУ. 2002. — 149 с.
22. Временное руководство по проектированию процесса замораживания пород для проходки вертикальных стволов шахт. — Харьков: ВНИИОМШС. 1971. — 103 с.
23. ВСН 189-78 Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей, утв. Приказом Главного технического управления Министерства транспортного строительства СССР 10.05.1978. № 21. — 79 с.

24. Вялов С.С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений. — М.: Изд-во Ак. наук СССР. 1962. — 253 с.
25. Гончаров С.А. Термодинамика: учебник для вузов по направлению «Горное дело». 2-е изд. — М.: Изд-во МГГУ. 2002. — 441 с.
26. Горелик В.С. Комбинационное рассеяние света. — Соросовский образовательный журнал. 1997. № 6. — с. 91 — 96.
27. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. М.: Наука. 1984. — 230 с.
28. Денисов А.М. Введение в теорию обратных задач. — М.: Изд-во Моск. ун-та. 1995. — 207 с.
29. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах. — М.: Недра. 1990. — 360 с.
30. Долгов О.А. Методика расчета процесса замораживания горных пород при проходке стволов шахт способом замораживания на большую глубину. В кн.: Замораживание горных пород при проходке стволов шахт. — М.: Изд-во АН СССР. 1961. — с. 9 — 64.
31. Дорман Я.А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов. — М.: Транспорт. 1981. — 302 с.
32. Дорн Э., Краузе Р., Хайден Т.В. Бурение замораживающих скважин и замораживание пород компанией Thyssen Schachtbau для проходки и строительства скипового ствола Гремячинского ГОКа. — Горный журнал. 2011. № 1. — с. 104 — 108.
33. Джеймс Б., Рогачев Д. Распределенные системы контроля температуры на базе современных волоконно-оптических датчиков. — Технологии ТЭК М.: Нефть и капитал. 2005. № 1. — с. 5 — 11.
34. ЕвроХим — Годовые отчеты за 2014–2017. — [Офиц. сайт]. URL: <https://www.eurochemgroup.com/investors/reports-results/?lang=ru/> (дата обращения: 08.08.2019).
35. Ермаков С.М. Математическая теория планирования эксперимента. — М.: Изд. Наука. 1983. — 392 с.
36. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента: учебное пособие. — М.: Изд. Наука. 1987. — 320 с.
37. Ершов Э.В. Общая геокриология. Учебник — М.: Изд-во МГУ. 2002. — 682 с.
38. Иенминь Ма, Шурен Ван Проходка стволов в неустойчивых обводненных породах на шахтах КНР — Глюкауф (русск. изд). 1985. № 19. — с. 14 — 18.

39. Иудин М.М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения. — Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2009. Т. 6. № 1. — с. 46 — 50.
40. Кардона М. Рассеяние света в твердых тела. — М.: Мир. 1979. — 197 с.
41. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука. 1964. — 488 с.
42. Картозия Б.А. Пути совершенствования способа искусственного замораживания горных пород при сооружении шахтных стволов: дис. ... канд. техн. наук — М. 1969. — 230 с.
43. Картозия Б.А., Федунец Б.И., Шуплик М.Н., Малышев Ю.Н. Шахтное и подземное строительство. — М.: Изд-во Академии горных наук. 2001. Т. 1 — 607 с.
44. Кацауров И.Н., Тютюнник П.М., Картозия Б.А. Исследование скорости распространения ультразвука в замороженном песке при объемном напряженном состоянии. — Техническая акустика в горном деле. М.: МГИ. 1968. — с. 46 — 59.
45. Кормщиков Д.С., Паршаков О.С. Применение оптоволоконной термометрии в горном деле. — Сборник тезисов II Всероссийской конференции. Пермь. 2018. — с. 33 — 35.
46. Королев В.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики температуры и давления в биомедицине. — Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. XVIII. № 3. — с. 256 — 258.
47. Кузина А.В. Систематизация причин повреждений замораживающих колонок при строительстве глубоких вертикальных стволов с использованием метода искусственного замораживания. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. — с. 396 — 402.
48. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Дроздов А.В., Соловьев Д.Е. Геотермический контроль грунтов основания копров и устьев части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника «Удачный» (Якутия). — Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 5. — с. 82 — 91.
49. Ландис Е.М. О единственности решения задачи Коши для параболического уравнения. — ДАН СССР. 1952. Т. 83. № 3. — с. 345 — 348.
50. Лапшина Ю.В., Рыбка В.Ф. Результат применения оптоволоконных технологий распределенной термометрии при освоении скважины с помощью ЭЦН. — Экспозиция Нефть ГАЗ. 2013. — с. 13 — 16.
51. Латтес Р., Лионс Ж. Л. Метод квазиобращения и его приложения. — М.: Мир. 1970. — 336 с.

52. Левин Л.Ю., Головатый И.И., Диулин Д.А., Паршаков О.С. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов. — Горный журнал. Издательство «Руда и металлы». 2018. № 8. — с. 48 — 53.
53. Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Паршаков О.С. Контроль формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся стволов Петриковского ГОК на основе оптоволоконной термометрической технологии. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. Т. 1. № 5-1. — с. 129 — 136.
54. Левин Л.Ю., Колесов Е.В., Семин М.А. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения замораживающих колонок при проходке шахтных стволов. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. — с. 257 — 265.
55. Левин Л.Ю., Плехов О.А., Пантелеев И.А., Паршаков О.С. Экспериментальные измерения температуры породного массива с использованием оптоволоконной технологии для анализа формирования ледопородного ограждения шахтных стволов. — Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. 2017. — с. 292 — 293.
56. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Математический метод прогнозирования толщины ледопородного ограждения при проходке стволов. — ФТПРПИ. Новосибирск. 2017. — с. 154 — 161.
57. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. — с. 255 — 267.
58. 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.
59. Маньковский Г.И. Специальные способы проходки горных выработок. — М.: Углетехиздат. 1958. — 454 с.
60. Мейрманов А.М. Задача Стефана. — Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 1986. — 240 с.
61. Мишедченко О.А. История развития способа искусственного замораживания пород. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 2. — с. 226 — 231.

62. Мониторинг скважины с помощью средства распределенного измерения. Хилл Д., Макьюэн-Кинг М., Тинделл П.; патентообладатель Оптасенс Холдингз Лимитед (GB). — патент № 2568652, опубликовано 20.11.2015. Бюл. № 32. — 6 с.
63. Мониторинг гидравлического разрыва пласта. Хилл Д., Макьюэн-Кинг М., Тинделл П.; патентообладатель Оптасенс Холдингз Лимитед (GB). — патент № 2648743, опубликовано 28.03.2018. Бюл. № 10. — 6 с.
64. Мусакаев Н.Г., Романюк С.Н., Бородин С.Л. Численное исследование закономерностей движения фронта фазового перехода в многолетнемерзлых породах — Известия вузов. Нефть и газ. 2011. № 6. — с. 122 — 128.
65. Насонов И.Д., Шуплик М.Н. Закономерности формирования ледопородного ограждения при сооружении стволов шахт. — М.: Недра. 1976. — 237 с.
66. Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н., Ресин В.И. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства. — М.: Недра. 1992. — 352 с.
67. Николаев П.В., Шуплик М.Н. Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 11. — с. 243 — 251.
68. Новиков Е.А., Шкуратник В.Л. Геоконтроль на горных предприятиях. — ИД МИСиС. 2019. — 174 с.
69. Ольховиков Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра. 1984. — 238 с.
70. Паланкоев И.М. Обоснование параметров технологии проходки шахтных стволов в искусственно замороженных породах: дис. ... канд. техн. наук — М. 2015. — 189 с.
71. Паланкоев И.М. Оценка степени риска возникновения аварийных ситуаций при строительстве вертикальных шахтных стволов способом искусственного замораживания. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. — с. 44 — 51.
72. Паршаков О.С. Разработка способа контроля формирования и состояния ледопородного ограждения шахтных стволов. — Стратегия и процессы освоения георесурсов. ГИ УрО РАН. Пермь. 2017. — с. 288 — 292.
73. Паршаков О.С. Контроль и управление состоянием ледопородных ограждений при строительстве шахтных стволов. — Стратегия и процессы освоения георесурсов. ГИ УрО РАН. Пермь. 2018. — с. 266 — 271.

74. Паршаков О.С. Обзор аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов специальным способом искусственного замораживания горных пород — Горное эхо. Горный институт УрО РАН. № 2 (75). 2019. — с. 89 — 91.
75. ПБ 03-428-02 Правила безопасности при строительстве подземных сооружений, утв. постановлением Госгортехнадзора России 01.11.2001 г. № 49. — 167 с.
76. Правила технической безопасности при проходке стволов шахт специальными способами: утв. постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 17.03.2004. № 5. 2004. — 14 с.
77. Разработка исходных данных для проекта проходки стволов. — Отчет о НИР № 58-12. Книга 1. Этап 10.1. — Минск. ОАО «Белгорхимпром». 2013. — 192 с.
78. Распределенный волоконно-оптический кабель-датчик. Абаев Р.Р., Пигарев В.П., Андриановский А.В.; патентообладатель ООО «Саранскабель-Оптика» (RU), ООО «ПетроЛайт» (RU). — патент № 175594, опубликовано 11.12.2017. Бюл. № 35. — 6 с.
79. Риз А. Историческое и техническое развитие способа проходки стволов замораживанием — Глюкауф (русс. изд.). 1982. № 2. — с. 3 — 13.
80. Роменский А.А. Обоснование параметров проходческого цикла и ледопородного ограждения при строительстве вертикальных стволов: дисс. ... канд. техн. наук — Москва. 1983. — 227 с.
81. Роменский А.А., Патин Г.Ф. Распределение температуры в массиве замороженных пород. — Подземная разработка тонких и средней мощности угольных пластов. Тула: ТЛИ. 1979. — с. 48 — 53.
82. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. — М.: Стройиздат. 1973. — 191 с.
83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2018666337. «FrozenWall». Богомягков А.В., Зайцев А.В., Ключкин 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. опублик. 17.12.2018. Реестр программ для ЭВМ. — 1 с.
84. Способ проходки вертикальных шахтных стволов в обводненных неустойчивых породах и устройство для его осуществления. Корчак А.В., Картозия Б.А., Кузина А.В., Вознесенский А.С., Мишедченко А.Д., Мишедченко А.А.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный горный университет (МГГУ) (RU). — патент № 2398967 С1, опубликовано 10.09.2010. Бюл. № 25. — 12 с.

85. СП 103.13330.2012 Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод, утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 30.06.2012 г. — 68 с.
86. СП 45.13330.2012 Земляные сооружения, основания и фундаменты, утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 29.12.2011 г. — 140 с.
87. Тарасов В.В., Пестрикова В.С. Обзор аварийных ситуаций, возникших на Верхнекамском калийном месторождении при проходке шахтных стволов. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. — с. 23 — 29.
88. Теоретическое исследование процесса формирования ледопородного ограждения в слоистом обводненном массиве горных пород. — Отчет о НИР № 36.16 — Пермь. ИМСС УрО РАН. 2016. — 144 с.
89. Тихонов А.Н. Теорема единственности для уравнения теплопроводности. — Математический сборник. 1935. № 2. — с. 199 — 216.
90. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределенные волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности. — Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 2. — с. 64 — 72.
91. Трест «Шахтспецстрой» 65 лет деятельности и развития специальных способов проходки шахтных стволов. — М. 2008. — 346 с.
92. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. — М.: Углетехиздат. 1954. — 896 с.
93. Трупак Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. — М.: Недра. 1974. — 281 с.
94. Трупак Н.Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных стволов шахт. — М.: Недра. 1983. — 270 с.
95. Тютюнник П.М. Геоакустический контроль процессов замораживания и тампонирувания пород. — М.: Недра. 1994. — 251 с.
96. Тютюнник П.М., Картозия Б.А., Коновалихин В.Е. Ультразвуковой метод контроля состояния ледопородных ограждений. — Шахтное строительство. 1973. № 10. — с. 11 — 14.
97. Тютюнник П.М., Роменский А.А. Комплексный контроль ледопородного ограждения при сооружении ствола шахты. — Шахтное строительство. 1984. № 11. — с. 14 — 19.

98. Тютюнник П.М., Солодов А.М. Методические указания по лабораторно-практическим занятиям по разделу «Контроль процессов замораживания пород в подземном строительстве» Ч. II. — М.: МГИ. 1991.
99. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов). — М.: Наука. 1971. — 312 с.
100. Федюкин В.А. Проходка стволов шахт способом замораживания. — М.: Недра. 1988. — 352 с.
101. Хакимов Х.Р. Замораживание грунтов для строительных целей. — Москва. 1949. — 112 с.
102. Хайден Т.В., Вегнер Б. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов. — Горный журнал. 2014. № 9. — с. 65 — 69.
103. Хайден Т.В., Краузе Р., Дорн Э. Бурение замораживающих скважин и замораживание пород для стволов № 1 и № 2 рудника «Усольского калийного комбината» в Российской Федерации. — Thyssen Mining Report. 2013. — с. 38 — 43.
104. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Соловьев Д.Е. Расчет температурного поля засоленных горных пород в устьевой части вертикального ствола при работе замораживающей системы. — ФТПРПИ. Новосибирск. 2016. № 3. — с. 176 — 184.
105. Шишкин В.В., Грачев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков. — Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. — с. 61 — 75.
106. Шуплик М.Н., Насонов М.Н., Плохих В.А., Никифоров К.П., Киселев В.Н. Перспективы замораживания грунтов в подземном строительстве. — Подземное пространство мира. 2001. № 4. — с. 28 — 38.
107. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. — Киев: изд-во АН УССР. т. 1. 1959. — 430 с.
108. Якунин А. Новые возможности применения оптоволокна в электроэнергетике. — Новости ЭлектроТехники. 2008. № 2(50). — с. 2 — 3.
109. Alexiades V., Solomon A.D. Mathematical modeling of melting and freezing processes. — Washington DC: Hemisphere. 1993. — 336 p.
110. Alzoubi M.A., Sasmito A.P., Madiseh A., Hassani F.P. Freezing on demand (FOD): An energy saving technique for artificial ground freezing. — Energy Procedia. 2019. 158. — pp. 4992 — 4997.

111. Alzoubi M.A., Nie-Rouquette A., Sasmito A.P. Conjugate heat transfer in artificial ground freezing using enthalpy-porosity method: Experiments and model validation. — *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. 126. — pp. 740 — 752.
112. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. — Springer US. 1994. — 352 p.
113. Bell J.B. The Non-characteristic Cauchy Problem for a Class of Equations with Time Dependence. — *SIAM J. Math. Anal.* 1981. Vol. 12. — pp. 759 — 777.
114. Bittelli M., Flury F., Roth K. Use of dielectric spectroscopy to estimate ice content in frozen porous media. — *Water Resour. Res.* 2004. Vol. 40. — pp. 1 — 11.
115. Brentle J.O., Dr. S. Growig The application of fibre optic measurement techniques in the mining sector, the oil & gas industry as well as in geothermal project. — 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 14-16 October 2014, Sapporo, Japan.
116. Bouyoucos G.J. Degree of temperature to which soils can be cooled without freezing. — *Journal of Agricultural Research*. 1920. No. 20. — pp. 267 — 269.
117. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations. — New York: John Wiley & Sons. 2008. — 440 p.
118. Cannon J.R. A Cauchy Problem for the Heat Equation. — *Ann. Math. Pura Appl.* 1964. Vol. 66. — pp. 155 — 166.
119. Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. — *Electronic Letters*. 1985. Vol. 21. pp. 569 — 570.
120. Danielian Yu.S., Yanitsky P.A., Cheverev V.G., Lebedenko Yu.P. Experimental and theoretical heat and mass transfer research in frozen soils. — *J. Eng. Geol.* 1983. No. 3. — 77 — 83.
121. Dirksen C., Miller R.D. Closed-system freezing of unsaturated soil. — *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966. No. 30. — pp. 168 — 173.
122. Ewing R.E. The Cauchy Problem for a Linear Parabolic Equation. — *J. Math. Anal. Appl.* 1979. Vol. 71. — pp. 167 — 186.
123. Fadale T.D., Nenarokomov A.V., Emery A.F. Two approaches to optimal sensor locations. — *Journal of Heat Transfer*. 1995. Vol. 117. No. 2. — pp. 373 — 379.
124. Fisher R.A. The freezing of water in capillary systems: A critical discussion. — *Journal of Physical Chemistry*. 1924. No. 28. — pp. 36 — 67.
125. Furukawa Y., Shimada W. 3-dimensional pattern-formation during growth of ice dendrites, its relation to universal law of dendritic growth. — *J. Crystal Growth* 1993. Vol. 128. — pp. 234 — 249.

126. George B. Downhole Temperatures from Optical Fiber. — Oilfield Review Winter 2008/2009. 2009. Vol. 20. No. 4. — pp. 34 — 39.
127. Goldman N. Inverse Stefan Problems. — Springer Science & Business Media, 2012. — 412 p.
128. Grobwig S., Hurtig E., Kuhn K., Rudolph F. Fibre optic temperature sensing: A new tool for temperature measurements in boreholes. — Geophysics. 1996. Vol. 61. No. 4. pp. 1065 — 1067.
129. Grobwig S., Hurtig E., Kuhn K., Rudolph F. Distributed Fibre-optic Temperature Sensing Technique (DTS) for Surveying Underground Gas Storage Facilities. — OIL GAS. European Magazine. 2001. Vol. 4. pp. 31 — 34.
130. Guymon G.L., Hromadka Ii T.V., Berg R.L. A one dimensional frost heave model based upon simulation of simultaneous heat and water flux. — Cold Reg. Sci. Technol. 1980. Vol. 3 (2/3). pp. 253 — 262.
131. Hansson K., Simunek J., Mizoguchi M., Lundin L.C., Van Genuchten, M.T. Water flow and heat transport in frozen soil numerical solution and freeze–thaw applications. — Vadose Zone J. 2004. No. 3 (2). — pp. 693 — 704.
132. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. — Water Resource Research. 1973. No. 9. — pp. 1314 — 1323.
133. Harris J.S. Ground Freezing in Practice. — Thomas Telford Limited. 1995. — 290 p.
134. Hoekstra P. Moisture movement in soil under temperature gradients with the cold side temperature below freezing. — Water Resource Research. 1966. No. 2. — pp. 241-250.
135. Hu H., Argyropoulos S.A. Mathematical modelling of solidification and melting: a review. — Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 1996. Vol. 4. — pp. 371 — 396.
136. Hu H., Yang S., Lei Z. A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing. — J. Hydraul. Eng. 1992. No. 7. — pp. 1 — 8.
137. Hurtig E., Grobwig S., Jobmann M., Kuhn K., Marschall P. Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes: experimental application for fluid logging. — Geothermics. 1994. Vol. 23. No. 4. — pp. 355-364.
138. Jame Y.W. Heat and mass transfer in freezing unsaturated soil. Ph.D. dissertation. University of Saskatchewan. 1977. — 212 p.
139. Jame Y.W., Norum D.I. Heat and mass transfer in freezing unsaturated porous media. — Water Resource Research. 1980. Vol. 16. — pp. 811-819.

140. Jarny Y., Ozisik M.N., Bardon J.P. A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction. — *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1991. Vol. 34. No. 11. — pp. 2911 — 2919.
141. Karalashvili M., Marquardt W., Mhamdi A. Optimal experimental design for identification of transport coefficient models in convection–diffusion equations. — *Computers & Chemical Engineering*. 2015. T. 80. — pp. 101 — 113.
142. Kemper W.D. Water and ion movement in thin films as influenced by the electrostatic charge and diffuse layer of cations associated with clay mineral surfaces. — *Soil Science Society of America Proceedings*. 1960. No. 24. — pp. 10 — 16.
143. Konrad J.M., Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils. — *Can. Geotech. J.* 2005. Vol. 42, pp. 38 — 50.
144. Kruschwitz J., Bluhm J. Modeling of ice formation in porous solids with regard to the description of frost damage. — *Computational Material Science*. 2005. Vol. 3–4. pp. 407 — 417.
145. Kurylyk B.L., Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils. — *Advances in Water Resources*. 2013. Vol. 60. — pp. 160 — 177.
146. Lars Hoffmanna, Mathias S., Müllera, Sebastian Krämerb, Matthias Giebelc, Günther Schwotzerc, Torsten Wieduwiltc Applications of fibre optic temperature measurement. — *Estonian Journal of Engineering*. 2007. Vol. 13. No. 4 — pp. 363 — 378.
147. Lewis R.W., Ravindran K. Finite element simulation of metal casting. — *International journal for numerical methods in engineering*. 2000. Vol. 47. No. 1-3. — pp. 29 — 59.
148. Maddox I.J. *Elements of functional analysis*. 2nd ed. — Cambridge. 1988. — 256 p.
149. McKenzie J.M., Voss C.I., Siegel D.I. Groundwater flow with energy transport and water–ice phase change: numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs. — *Adv Water Resour.* 2007. No. 30. — pp. 966 — 983.
150. Michalowski R.L., Zhu M. Frost heave modeling using porosity rate function. — *Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2006. No. 30. — pp. 703 — 722.
151. Mikkola M., Hartikainen J. Mathematical model of soil freezing and its numerical application. — *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. — 2001. Vol. 52. — pp. 543 — 557.
152. Mottagy D., Rath V. Latent heat effects in subsurface heat transport modeling and their impact on palaeotemperature reconstruction. — *Geophys. J. Int.* 2006. Vol. 164. — pp. 236–245.

153. Nakano Y., Mathematical model on the steady growth of an ice layer in freezing soils. — In: Maeno N., Mondoh T. (Eds.), *Physics and Chemistry of ice*. Hokkaido University Press. 1992. — pp. 364 — 369.
154. Nixon J.F. Discrete ice lens theory for frost heave beneath pipelines. — *Canadian Geotechnical Journal*. 1992. Vol. 29. pp. 487 — 497.
155. Ozisik M.N. *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. — CRC Press. 2000. — 352 p.
156. Pantelev I.A., Kostina A.A., Plekhov O.A., Levin L.Yu. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes. — *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017. Vol. 9. No. 4. — pp. 363-377.
157. Perfect E., Williams P. Thermally induced water migration in frozen soils. — *Cold Reg. Sci. Technol*. 1980. Vol. 3. — pp. 101 — 109.
158. Prilepko A.I., Orlovsky D.G., Vasin I.A. *Methods for Solving Inverse Problems in Mathematical Physics*. — New York. Basel: Marcel Dekker. 1999. — 744 p.
159. Rempel A.W., Wettlaufer J.S. Premelting dynamics in a continuum model of frost heave. — *Journal of fluid mechanics*. — 2004. Vol. 498. — pp.227 — 244.
160. Schmall P., Brinckerhoff P., Ott K., Madsen P. ESA's SEM challenge. — *North American Tunneling Journal*. 2013. — pp. 24 — 26.
161. Schmall P., Maishman D. Ground freezing a proven technology in mine shaft sinking. — *Tunneling & Underground Construction*. 2007. — pp. 25 — 30.
162. Schmall P., Sopko J. The big freeze: Brine vs Liquid Nitrogen. — *North American Tunneling Journal*. 2011. — pp. 23 — 26.
163. Schofield R.K. The PF of the water in soil. — *Transactions 3rd International Congress of Soil Science*. 1935. Vol. 2. — pp. 37 — 48.
164. Shamsundar N., Sparrow E.M. Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model — *Journal of Heat Transfer*. 1975. Vol. 97. No. 3. — pp. 333 — 340.
165. Sheng D.C., Axelsson K., Knutsson S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils. In: *theory and verification*. Nord. Hydrol. 1995. Vol. 26. — pp. 125 — 146.
166. Shoop S.A., Bigl S.R. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: modeling and large scale experiments. — *Cold Reg. Sci. Technol*. 1997. Vol. 25 (1). — pp. 33 — 45.
167. Sopko J. Ground Control. — *Tunnels and tunneling. Technical/Geotechnical Engineering*. — October-November 2017. — pp. 34 — 37.

168. Sopko J. Coupled Heat Transfer and Groundwater Flow Models for Ground Freezing. — ASCE GeoFlorida. — 2017. — pp. 719 — 729.
169. Talamucci F. Freezing process in porous media: formation of ice lenses, swelling of the soil. — J. Math. Comput. Model. 2003. Vol. 37. — pp. 595 — 602.
170. Taylor G.S., Luthin J.N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. — Can. Geotech. J. 1978. Vol. 15 (4). — pp. 548 — 555.
171. Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. Solutions of Ill-Posed Problems. — Winston & Sons, Washington, DC. 1977. — 258 p.
172. Tounsi, H., Rouabhi, A., Tijani, M., Guérin, F. 3d numerical modeling of artificial ground freezing in mining engineering. — Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art- Proceedings of the WTC. ITA-AITES World Tunnel Congress. 2019. pp. 1599 — 1606.
173. Ucinski D. Optimal measurement methods for distributed parameter system identification. — CRC Press. 2005. — 371 p.
174. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydraulic modeling of artificial ground freezing: Application to an underground mine in fractured sandstone. — Computers and Geotechnics. 2016. 75. — pp. 80 — 92.
175. Voller V.R., Swaminathan C.R., Thomas B.G. Fixed grid techniques for phase change problems: a review. — International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1990. Vol. 30. No. 4. — pp. 875 — 898.
176. Woodbury K.A. (ed.). Inverse engineering handbook. — CRC press. 2002. — 466 p.
177. Yang W.-H. Du Z.-B., Yang Z.-J., Bo D.-L. Plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock — Chinese Journal of Geotechnical Engineering. — 2013. Vol. 35. No. 10. — pp. 1857 — 1862.
178. Zhang B., Yang W., Wang B. Plastic Design Theory of Frozen Wall Thickness in an Ultradeep Soil Layer Considering Large Deformation Characteristics — Mathematical Problems in Engineering. — 2018. — 10 p.
179. Zhou M.M., Meschke G. A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils. — International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. — 2013. Vol. 37. — pp. 3173 — 3193.
180. Zhou Y., Zhou G. Finite volume simulation for coupled moisture and heat transfer during soil freezing. — Chin. J. Geotech. Eng. 2010. Vol. 32 (3). — pp. 440 — 446.