

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

На правах рукописи



Головатый Иван Иванович

РАЗРАБОТКА СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ЗАМОРАЖИВАНИЕМ ПОРОДНОГО
МАССИВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТВОЛОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, чл.-корр. РАН
Левин Лев Юрьевич

Пермь 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Проблемы обеспечения безопасности строительства и эксплуатации стволов калийных рудников.....	11
1.2 Наблюдения за состоянием ледопородного ограждения на стадии активного замораживания	15
1.3 Управление тепловым состоянием породного массива на стадии пассивного замораживания	19
1.4 Анализ методов расчета параметров ледопородного ограждения в замораживаемом обводненном породном массиве.....	21
1.5 Цель и задачи исследования.....	24
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАМОРАЖИВАЕМЫХ ПОРОДАХ	26
2.1 Общие сведения о методике лабораторных исследований керна	28
2.2 Краткие сведения о литологии геологического разреза на участках строительства исследованных шахтных стволов и их конструктивных элементах	30
2.3 Технология распределенных измерений температуры массива горных пород в естественном залегании в процессе их искусственного замораживания	40
2.4 Анализ изменений температурного поля в породном массиве по данным контрольно-термических скважин при активном и пассивном замораживании	43
2.5 Исследование особенностей размораживания пород с помощью расширенного функционала оптоволоконной системы термометрического контроля ЛПО	55
2.6 Выводы по главе.....	58
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД	61
3.1 Содержательная постановка задачи тепломассопереноса при формировании ледопородного ограждения.....	61
3.2 Математическая постановка задачи	63
3.3 Параметризация модели по данным натурных измерений	68
3.4 Выводы по главе.....	77
4 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ.....	79
4.1 Исследование временной динамики поля температур в объеме замороженных пород.....	79
4.2 Неоднозначность существующих критериев оценки несущей способности ледопородного ограждения.....	82
4.3 Разработка нового критерия оценки несущей способности ледопородного ограждения.....	88

4.4	Анализ временной динамики предельной несущей способности ледопородного ограждения.....	90
4.5	Выводы по главе.....	92
5	РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИКОЙ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТВОЛОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ.....	94
5.1	Общая концепция и критерии управления режимом замораживания горных пород.....	94
5.2	Управление замораживанием при формировании ледопородного ограждения	96
5.3	Оптимизация работы замораживающей станции на этапе поддержания ледопородного ограждения.....	103
5.4	Управление тепловым состоянием породного массива на этапе размораживания ледопородного ограждения.....	112
5.5	Выводы по главе.....	115
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	119

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности строительства и эксплуатации калийных рудников неразрывно связано с защитой подземных горных выработок от проникновения подземных вод в силу растворимости калийных солей в воде. Поэтому строительство шахтных стволов калийных рудников, особенно в сложных гидрогеологических условиях, осуществляется с использованием специальных способов, наиболее распространенным и эффективным из которых является искусственное замораживание пород и создание водонепроницаемого ледопородного ограждения (ЛПО).

Искусственное замораживание пород – это технически и организационно сложный, длительный и очень дорогостоящий вид работ, поскольку суммарная длительность стадий активного и пассивного замораживания составляет обычно не менее года, в течение которого непрерывно работает замораживающая станция, охлаждающая рассол до заданных температур. Для типичных глубин замораживания в 200-250 м средняя мощность станции обычно составляет 500-800 кВт, что приводит к финансовым затратам только за электроэнергию в десятки миллионов рублей в год.

Непрерывный рост мировых потребностей в калийных удобрениях вынуждает производителей, в том числе ОАО «Беларуськалий», ПАО «Уралкалий», АК «МХК «ЕвроХим», АО «Верхнекамская калийная компания», расширять производство и вести проходку новых шахтных стволов. В этих условиях эффективное управление холодопроизводительностью замораживающей станции, обеспечивающей создание и поддержание функционально надежного ЛПО, становится все более актуальным.

Практика показала, что центральным моментом такого управления, помимо мощности замораживающей станции и расположения замораживающих колонок, является принятие решения об окончании активной стадии замораживания и переходе к пассивной стадии – поддержанию функциональности ЛПО. Замораживаемый породный массив является крайне сложной и неоднородной по своему составу и свойствам системой, в которой одновременно протекает множество взаимосвязанных теплофизических и геомеханических процессов. Поэтому выработка научно обоснованных критериев управления межстадийным переходом требует глубокого теоретического знания происходящих при замораживании и размораживании горного массива геомеханических и теплофизических процессов.

Более того, такое знание, доведенное до применимых на практике критериев, позволяет применить идеи управления «по требованию» к созданию и поддержанию ЛПО. Это позволит одновременно решить комплекс проблем, связанных с повышением надежности ЛПО, а также

предотвратить ненужное перемораживание и опасное недомораживание породного массива. Все это в целом повысит энергоэффективность работы замораживающей станции.

Обеспечение безопасности и энергоэффективности искусственного замораживания пород невозможно без выбора правильных критериев оценки несущей способности ЛПО, организации подробного и непрерывного мониторинга его состояния для принятия своевременных решений об изменении параметров работы замораживающей станции. Выбор таких критериев, несомненно, должен опираться на содержательную теорию теплофизических и геомеханических процессов, протекающих при замораживании в реальных породных массивах.

Такая теория благодаря развитию измерительной аппаратуры, вычислительной техники и средств математического моделирования активно совершенствуются в последние десятилетия. Значительный вклад в эту теорию внесли такие исследователи: Н.Г. Трупак, О.А. Долгов, Б.В. Бахолдин, Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков, М.А. Alzoubi, М.М. Zhou, G. Meschke, S. Huang и др.

Однако, несмотря на значительные достижения, современные теории и способы управления замораживанием пород всё еще не образуют единую систему, обоснованную успешным практическим применением, поскольку многие разрабатываемые и описываемые в литературе подходы и способы управления замораживанием не прошли должную апробацию на практике. Зачастую исследователи ограничиваются лабораторными тестами, упрощенными математическими моделями, рассматривают идеализированные ситуации, далекие от практики реальной проходки шахтных стволов. Всё это приводит к использованию завышенных по соображениям безопасности критериев управления замораживанием пород и состоянием несущей способности ЛПО, не учитывающих динамику пространственной неоднородности распределения температур и прочностных свойств ЛПО на различных стадиях замораживания.

Поэтому разработка и практическая апробация адекватных критериев управления состоянием ЛПО, учитывающих динамику пространственной неоднородности распределения температур и прочностных свойств в объеме замороженных пород на различных стадиях замораживания, является актуальным и перспективным для достижения существенного практического эффекта в реальных условиях горного производства калийной отрасли. Именно это и было реализовано нами на примере управления замораживанием и размораживанием пород при строительстве стволов Дарасинского рудника ОАО «Беларуськалий».

Цель работы

Разработать способ управления параметрами замораживающей станции и параметрами проходки на стадии пассивного замораживания и размораживания пород.

Основная идея работы состоит в разработке подходов к управлению процессами замораживания, включающих в себя дифференцированное рассмотрение интервала замораживаемых пород на основе непрерывного мониторинга температурного поля, математического моделирования и применения нового критерия оценки несущей способности ледопородного ограждения, учитывающего неоднородное распределение теплофизических и прочностных свойств в объеме замороженных пород.

Основные задачи работы

1. Провести детальные экспериментальные измерения распределений температуры по глубине контрольно-термических скважин при формировании, поддержании и оттаивании ледопородного ограждения вокруг строящихся стволов калийных рудников.
2. Разработать математическую модель системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь ствола» и параметризовать ее по данным экспериментальных измерений.
3. Провести многопараметрическое моделирование процессов искусственного замораживания пород для условий строящегося калийного рудника с целью выявления закономерностей временного изменения температурного поля породного массива на всех стадиях искусственного замораживания пород.
4. Разработать критерий оценки несущей способности ледопородного ограждения, применимый для различных стадий искусственного замораживания пород.
5. Разработать подход и принципы управления параметрами замораживающей станции на стадии пассивного замораживания и размораживания пород.

Методы исследований основаны на структурно-системном подходе к решению поставленных задач, включают в себя анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования по временной динамике температуры породного массива в контрольно-термических скважинах, обработку экспериментальных данных, теоретический анализ закономерностей протекания различных физических процессов в замораживаемом породном массиве, формулирование математической модели поведения породного массива при его

замораживании, численное компьютерное моделирование, сравнительный анализ результатов численного и натурального экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности временной динамики неоднородного поля температур в замороженных породах на всех стадиях искусственного замораживания, установленные в результате серии численных расчетов на математической модели теплопереноса, параметры которой актуализированы с помощью данных непрерывного натурального мониторинга температур в замороженных породах.
2. Важнейшим критериальным показателем при управлении состоянием ледопородного ограждения на всех стадиях замораживания является текущая несущая способность, рассчитываемая исходя из предельной механической нагрузки на внешнюю стенку ледопородного ограждения с учетом установленной зависимости прочности пород от температуры.
3. Способ управления параметрами работы замораживающей станции, основанный на принципах дифференцированного рассмотрения интервала замораживаемых пород и комплексной минимизации затрат на работу системы замораживания и горнопроходческие работы, позволяет повысить энергоэффективность системы замораживания при соблюдении требований безопасности и надежности.

Научная новизна:

1. Установлены закономерности временных изменений и характера пространственной неоднородности параметров ледопородного ограждения на протяжении всего периода его существования.
2. Предложен и научно обоснован новый критерий оценки несущей способности ледопородного ограждения, учитывающий неоднородное распределение теплофизических и прочностных свойств в объеме замороженных пород и позволяющий оптимизировать режим работы замораживающей станции на всех стадиях искусственного замораживания пород.
3. Разработаны и теоретически обоснованы принципы управления замораживанием «по требованию», основанные на дифференцированном рассмотрении интервала замораживания пород, обеспечивающие комплексную минимизацию затрат на работу системы замораживания и горнопроходческие работы и составляющие основу предложенного способа управления процессом замораживания.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием основным естественнонаучным законам, сравнением результатов аналитических и численных решений с данными натурных экспериментов, сопоставимостью результатов работы с данными, полученными другими исследователями, а также обширным объемом натурных наблюдений, осуществленных в реальных условиях в ходе мониторинговых исследований искусственного замораживания пород при строительстве стволов на рудниках ОАО «Беларуськалий».

Практическое значение и реализация результатов работы

Разработанные принципы управления замораживанием «по требованию» реализованы на практике в процессе термометрического контроля искусственного замораживания пород на строящихся шахтных стволах Дарасинского рудника ОАО «Беларуськалий», что позволило существенно уменьшить затраты на строительство шахтных стволов без снижения требований к обеспечению безопасности.

Предложенный способ определения и контроля несущей способности ледопородных ограждений строящихся стволов шахт и разработанная для этого в рамках данного исследования измерительная аппаратура запатентованы.

Результаты, полученные в рамках настоящего исследования, могут быть применены в практике замораживания пород и использования современных систем мониторинга и управления образованием ледопородных ограждений для самых различных подземных сооружений, строящихся в сложных гидрогеологических условиях.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований ПФИЦ УрО РАН, проводившихся в период 2020—2024 гг., по темам «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими и аэрологическими процессами в рудничной атмосфере и массивах горных пород при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (регистрационный номер НИОКТР: 122012000396-6), «Комплексное моделирование геофизических, геомеханических и аэрологических процессов в горнотехнических системах» (регистрационный номер НИОКТР: 122030100425-6), а также с тематикой хоздоговорных работ между ПФИЦ УрО РАН и ОАО «Беларуськалий».

С 2020 по 2024 гг. исследования по теме диссертации были поддержаны и частично финансировались Российским научным фондом (проект РНФ № 19-77-30008 «Разработка

теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов»), Министерством науки и высшего образования Пермского края (Соглашение № С-26/563 по проекту Международных исследовательских групп «Исследование влияния миграции минерализованных подземных вод на формирование и механические характеристики ледопородных ограждений строящихся горных выработок»).

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» (Пермь, 2023-2024 г.), на IV и V Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей» (Пермь, 2023 г., 2024 г.), на XXIII Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2023 г.), на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2023 г.), на 15-й конференции Аргус «Удобрения в странах Азии 2019» (Шанхай, 2019 г.), на ежегодной конференции Международной ассоциации производителей удобрений (Монреаль, 2019 г.; Лиссабон, 2021 г.).

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, экспериментальные исследования в условиях промплощадок строящихся рудников, анализ и обработка полученных данных, постановка математической модели, настройка ее параметров и проведение численных экспериментов, разработка методик организации мониторинга и управления искусственным замораживанием пород и их практическая реализация, формулировка основных научных положений и выводов.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю — д-ру техн. наук, чл.-корр. РАН Льву Юрьевичу Левину за формирование научного направления работы, руководство и ценные указания, а также д-рам техн. наук Михаилу Александровичу Сёмину и Артему Вячеславовичу Зайцеву за постоянное внимание к работе, полезные советы и эвристически ценные идеи, подсказанные автору в ходе обсуждений промежуточных результатов его исследовательской работы.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 8 публикаций в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ; получено два патента.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 8 таблиц. Список использованных источников состоит из 136 наименований, в том числе 71 зарубежных.

1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Проблемы обеспечения безопасности строительства и эксплуатации стволов калийных рудников

Искусственное замораживание грунтов и пород — это специальный способ обеспечения безопасности строительства, используемый в ситуациях, когда необходимо стабилизировать грунт на участке ведения подземных работ, не допустить его обрушения и обеспечить надежную защиту от водопритоков в строящуюся горную выработку. Этот способ зародился в конце 19 века [8].

Первоначально он был разработан для облегчения строительства шахтных стволов и туннелей через водонасыщенный грунт, который в противном случае был бы нестабильным и склонным к обрушению. Этот метод предполагал циркуляцию хладоносителя по трубам, установленным в грунте, чтобы заморозить содержащуюся в его поровом пространстве воду, создав прочную и стабильную структуру из льда и твердых частиц грунта – т. н. ледопородное ограждение (ЛПО) [33].

В 1883 году немецкий инженер Ф. Х. Пётч изобрел способ искусственного замораживания грунта. Он успешно применил эту технику при строительстве угольной шахты в Германии, что стало первым практическим применением замораживания почвы [35].

Успех способа Пётча привел к его использованию в различных строительных проектах по всему миру. Этот метод получил широкое распространение в горнодобывающей промышленности, особенно в Европе и Северной Америке. Уже в 1910–1930-е годы искусственное замораживание использовалось в нескольких проектах горнодобывающей промышленности и гражданского строительства, таких как проходка шахт в Рурской долине в Германии и строительство системы метро Нью-Йорка. Эти ранние применения продемонстрировали эффективность способа в стабилизации заболоченных почв и контроле потока грунтовых вод [85, 125].

В середине 20-го века произошел прогресс в технологии охлаждения, который повысил эффективность и надежность способа искусственного замораживания. Использование соляных растворов, а затем и жидкого азота, позволило осуществить более быстрое и эффективное замораживание [35, 110].

Технологические достижения конца 20 века продолжали совершенствовать способ искусственного замораживания. Компьютерное моделирование и улучшенные материалы позволили более точно рассчитывать нестационарные неоднородные процессы, происходящие в замораживаемом породном массиве [73, 109]. Способ использовался в различных громких

проектах, включая строительство туннеля под Ла-Маншем между Великобританией и Францией [86], а также в многочисленных проектах строительства городских туннелей [14, 44]. Современные примеры применения часто включают использование жидкого азота или соляных растворов, циркулирующих по сети труб для достижения желаемого эффекта замораживания.

Несмотря на эффективность метода, были случаи, когда неправильное планирование, выполнение или мониторинг процесса искусственного замораживания приводили к авариям и сбоям как при строительстве городских тоннелей, так и при строительстве шахтных стволов. Причем такие случаи происходили не только на начальных этапах становления способа, но и в последние десятилетия. Мы сосредоточим внимание на обзоре аварии при строительстве шахтных стволов, так как это является предметом настоящего исследования.

Проходка шахтных стволов рудников зачастую сопряжена с рядом дополнительных сложностей: большая глубина ведения горных работ, высокие горное и гидростатическое давления, минерализация подземных вод. Во многом из-за этого шахтостроители сталкиваются с осложнениями и серьезными авариями, последствия которых могут привести к затоплению строящегося ствола и к реальной угрозе его полной потери. В существующей литературе зафиксировано множество примеров возникновения аварийных ситуаций при проходке стволов шахт и рудников с использованием искусственного замораживания [33, 36, 38, 43, 48, 56-59].

Систематизация причин аварий при строительстве стволов с использованием искусственного замораживания приведена в работах [25, 30]. Выявлены следующие основные причины осложнений:

- неполные данные о физических свойствах горных пород и водоносных горизонтов, наличие локальных неоднородностей;
- некорректные расчеты параметров замораживания;
- выход из строя замораживающих колонок и влияние технологических факторов, включающих некачественное сооружение крепи и гидроизоляции.

Часто встречается разрыв замораживающих колонок, причины которого не полностью выявлены. В период оттаивания ЛПО возникают температурные напряжения, приводящие к трещинам и разрушению материала многослойной крепи.

В работе [55] рассмотрены аварии, связанные с недооценкой сложных условий Верхнекамского месторождения. Анализ аварий при проходке шахтных стволов за 1948-2014 гг. показывает, что:

44 % (106 случаев) аварий связаны с неравномерностью замораживания и оттаивания горных пород,

26 % (63 случая) — с разрушением замораживающих колонок,

14 % (31 случай) — с внезапным прорывом воды или рассолов,

6 % (15 случаев) — с деформацией поверхности и поднятие копров.

Эти аварии приводят к задержкам ввода рудника в эксплуатацию, увеличению затрат на энергопотребление и снижению безопасности работ [32].

Данные о многих авариях не публикуются до завершения строительства и выхода рудника на проектную мощность. Полный анализ аварий за последнее десятилетие невозможен. Обзор наиболее серьезных аварий за этот период, о которых можно найти информацию в научной и технической литературе, представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Наиболее значимые аварийные ситуации за период с 2014 г. по 2024 г.

Месторождение, ГОК	Условия замораживания горных пород	Причина и последствия аварийной ситуации/осложнений
Гремячинское, Гремячинский	Замораживание пород вокруг ствола № 3 диаметром в свету 7 м. Глубина замораживания: - основной контур замораживающих колонок 520 м и 816 м; - дополнительный контур до 832 м. Рабочая температура хладоносителя -35 °С. Способ проходки ствола буровзрывной.	Неуправляемый водоприток возник на глубине проходки ствола 810 м. Возникновение прорыва воды в ствол связано со значительным отклонением замораживающих скважин от вертикали на данной глубине и неправильным выбором глубины замораживания на этапе проектирования. Это привело к образованию гидравлического «окна» в ледопородном ограждении и последующему затоплению ствола.
Гарлыкское (Карлюкское), Гарлыкский	Замораживание пород вокруг ствола № 2 диаметром в свету 6,5 м. Глубина замораживания 120 м. Рабочая температура хладоносителя -38 °С. Способ проходки ствола буровзрывной.	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.

Месторождение, ГОК	Условия замораживания горных пород	Причина и последствия аварийной ситуации/осложнений
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 устойчивости 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. 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 искусственного замораживания горных пород, создание научной базы для всех аспектов этого процесса, а также разработка инженерных методов расчета параметров ЛПО и холодильного оборудования способствуют снижению аварийности. Опубликованные данные свидетельствуют о сокращении серьезных аварийных ситуаций, таких как затопление шахтного ствола и разрушение замораживающих колонок в периоды замораживания и оттаивания [8, 43, 54, 61, 64].

Несмотря на существенный прогресс в областях экспериментальных измерений теплового состояния породного массива, методов численного расчета теплового и механического состояний замораживаемых пород, опыт последних лет показывает, что осложнения при строительстве стволов всё ещё случаются. Это указывает на то, что современные измерительные и программные средства применяются недостаточно осмысленно. Решить эту проблему и повысить осмысленность данных измерений вкупе с данными численного моделирования можно путем развертывания систем непрерывного мониторинга и

управления состоянием ЛПО как сложной геомеханической и термодинамической системой. Это и является одной из ключевых задач данного исследования.

1.2 Наблюдения за состоянием ледопородного ограждения на стадии активного замораживания

ЛПО формируется и функционирует в результате воздействия процессов замораживания и размораживания на горный массив. Эти процессы изменяют температурное и термодинамическое состояние пород, что определяет все их параметры.

В качестве основных управляющих воздействий в данном случае можно считать как пространственное расположение конструктивных элементов замораживания, так и временную динамику мощности системы охлаждения, расход и температуру хладоносителя. Остальные физические процессы в массиве (как термодинамические, так и геомеханические), происходят по законам природы и не зависят от человеческого вмешательства.

Основные критерии эффективности управления – **1) отсутствие проникновения воды в ствол и 2) отсутствие значительных деформаций незакрепленной стенки ствола** – очень важны с точки зрения обеспечения безопасной проходки ствола, а при невыполнении – манифестируют близкое к аварии или катастрофе состояние. Выполнение этих критериев является основной задачей стадии активного замораживания породного массива и зависит от всей предыстории процесса искусственного замораживания, а их внезапное нарушение требует много времени на устранение из-за длительности процессов передачи теплоты в породном массиве. Все это указывает на необходимость подробных наблюдений за состоянием породного массива, исследования различных параметров составляющих его элементов.

С этой точки зрения относиться к горному массиву следует как к сложному нелинейному по поведению природному системно-структурному объекту, временные параметры которого и характеристики процессов динамически меняются со временем. Сущность этих процессов – фазовые переходы, в окрестности которых свойства и поведение веществ меняются быстрым и, зачастую аномальным, образом [89, 118].

Другой существенной особенностью является возможная, и неоднократно выявляемая мелкомасштабная неоднородность свойств сформированного изначально породного массива на различных стадиях заморозки [126]. Все это осложняет управление его состоянием.

Как хорошо известно, целью искусственного замораживания породного массива является формирование вокруг шахтного ствола водонепроницаемого ограждения из ледопородного массива. ЛПО должно сохранять свою целостность и водонепроницаемость при

нагрузках горного и гидростатического давлений. Эффективность функционирования ЛПО зависит от двух основных параметров его состояния — герметичности (сплошности) и толщины [20, 23, 26, 33, 35, 65].

Из рациональных размышлений интуитивно ясно, что чем толще (мощнее) будет ЛПО, тем с большей долей вероятности оно будет водонепроницаемым, поскольку такой размер надежно перекроет возможные мелкомасштабные особенности массива, приводящие к его водопроницаемости. Поэтому на практике считают, что безопасность ведения горных работ в строящемся стволе будет обеспечена, если ЛПО, образующееся вокруг проектируемого ствола, будет иметь достаточную толщину и сплошность на всем интервале промерзания грунта (обычно до водоупорного слоя).

Но каковы конкретно эти толщины? Строго говоря, это современной науке неизвестно. Сегодня требуемые толщины ЛПО определяются на этапе проектирования по критериям прочности и ползучести [97, 100] ледопородного стакана и являются конечной целью этапа активного замораживания.

Мы считаем, что поскольку неоднородности массива много больше расстояний между разведочными скважинами и скважинами замораживания, что можно определить по кернам бурения этих скважин (неоднородности меньшего масштаба «ускользают» от внимания), толщина ледопородного массива должна быть не менее расстояний между скважинами.

Достижение требуемых толщин ЛПО обычно проверяют по данным экспериментального температурного мониторинга в контрольных скважинах [6].

Общие методы, приборы и системы мониторинга и контроля теплового состояния геосред описаны в работах [4, 7, 10, 37]. В них представлены основы геофизических исследований структуры, свойств и состояния геологической среды в зоне строительства, а также рассмотрены средства мониторинга технологических процессов и эксплуатационного контроля подземных сооружений.

Экспериментальные исследования процесса искусственного замораживания проводились Трупаком Н.Г., Тютюнником П.М., Картозией Б.А., Шупликом М.Н., Дорманом Я.А., Роменским А.А., Насоновым И.Д., Федюкиным В.А., Бельферманом М.У., Хакимовым Х.Р. [6, 20, 27, 28, 36, 49, 54, 58-61]. За рубежом данный вопрос исследовали Andersland O.B., Harris J.S., Sasmito A.P., Schmall P., Sopko J., Tijani M. [70, 72, 85, 119, 120, 123].

Способы натуральных измерений параметров замораживаемого породного массива по методам получения информации о его состоянии условно делятся на две группы — косвенные и прямые. Косвенные методы включают наблюдение за работой замораживающего комплекса

и оценку состояния ЛПО на основе упрощенных расчетов с использованием данных различных измерительных приборов.

Например, визуальный осмотр соединительных труб и отводящих головок замораживающих скважин используется для оценки работы замораживающих колонок: пушистый иней свидетельствует о нормальной работе колонок, а желтый, рыхлый иней — о неисправности.

Температуры прямого и обратного потоков хладоносителя в замораживающих колонках сравниваются для оценки эффективности процесса замораживания. Разность температур снижается по мере продвижения процесса, что указывает на уменьшение теплообмена в мерзлом массиве.

Для определения количества теплоты, отнимаемой хладоносителем от обводненного породного массива, используется специальная формула, учитывающая параметры потоков и теплофизические характеристики хладоносителя:

$$Q = W\gamma c(T_2 - T_1), \quad (1.1)$$

где W — расход хладоносителя в замораживающих колонках, м³/ч; γ — плотность хладоносителя, кг/м³; c — теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·°C); T_1 — температура прямого потока хладоносителя, °C; T_2 — температура обратного потока хладоносителя, °C.

Однако косвенные методы наблюдения неспособны полностью оценить сплошность и толщину ЛПО, так как теплораспределение в породном массиве зависит от множества факторов, таких как минералогический состав, пористость и теплофизические свойства горных пород, а также характеристики подземных вод. Для точной оценки этих параметров необходимо применять прямые методы измерения.

Прямые способы мониторинга состояния ЛПО 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 ЛПО при помощи пробуренных на участке замораживания породного массива контрольных скважин. К прямым методам мониторинга относятся акустический/ультразвуковой, гидронаблюдательный и термометрический.

Акустический/ультразвуковой метод определения состояния ЛПО основан на законах распространения упругих волн в породном массиве. Изменение агрегатного состояния обводненного породного массива ведет к изменению прочностных и упругих свойств горных пород, которые влияют 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 ЛПО. Основные принципы акустических методов контроля качества и процесса формирования ЛПО при сооружении подземных объектов представлены в работах [1, 2].

Гидронаблюдательный метод мониторинга 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 метод мониторинга ЛПО заключается в периодических измерениях температуры горных пород на различных участках и глубинах замораживаемого породного массива. По полученным данным определяют границы ЛПО.

В комплексе приведенные выше прямые методы мониторинга позволяют прогнозировать фактические параметры ЛПО, однако каждый из этих методов имеет ряд существенных недостатков. Например, для гидронаблюдательного метода основными недостатками являются невозможность определения толщины ЛПО и использование гидрогеологической скважины, свидетельствующей об отсутствии гидравлических «окон», только до начала проходки шахтного ствола. Это приводит к увеличению затрат на бурение или на сооружение сложной конструкции гидронаблюдательной скважины.

Акустический/ультразвуковой метод мониторинга также имеет свои ограничения, включая погрешности измерений упругих волн, вызванные относительной погрешностью используемой аппаратуры и наличием различных волн-«помех». Для определения толщины ЛПО по всему периметру замораживания за пределами его внешней границы требуется пробурить множество дополнительных скважин, что делает этот метод трудоемким и дорогостоящим.

Прямой метод мониторинга состояния ЛПО сопряжен с высокими трудозатратами, особенно в случае акустического/ультразвукового контроля, который включает три цикла измерений: нулевой, промежуточный и заключительный. Это обуславливает необходимость многократного вмешательства в процесс замораживания горных пород. Для определения толщины ЛПО по всему периметру замораживания требуется пробурить множество дополнительных скважин, хотя на практике часто ограничиваются одной скважиной, что позволяет определить толщину ЛПО локально лишь в одном месте.

К основным недостаткам термометрического метода относится ограниченность информации о температуре породного массива как по глубине, так и по площади участка замораживания. Бурение не более 3-4 контрольно-термических скважин часто оказывается

недостаточным. Использование сложных электронных и механических устройств для измерения температуры в агрессивных условиях может привести к их поломке, что, в свою очередь, может привести к потере данных о динамике пространственного и временного теплораспределения.

С развитием технологий искусственного замораживания внедряются новые подходы к измерению температуры горных пород, включая оптоволоконную термометрию, которая отличается стабильностью и помехозащищенностью. Однако даже при использовании новых технологий получение информации о температуре горных пород ограничивается местоположением контрольно-термических скважин [21, 31, 61, 76].

Термометрический метод, несмотря на указанные ограничения, на сегодняшний день является наиболее информативным и достоверным. Он позволяет непрерывно определять фактические параметры ЛПО в течение всего срока проведения работ по искусственному замораживанию породного массива, а также его размораживанию.

1.3 Управление тепловым состоянием породного массива на стадии пассивного замораживания

После достижения требуемых толщин ЛПО на протяжении всего интервала замерзания обычно происходит переход к стадии пассивного замораживания, целью которой является поддержание фиксированной толщины ЛПО. По окончании строительства ствола и его герметизации в интервале замораживания осуществляется переход от стадии пассивного замораживания к стадии размораживания.

Выбор подходящего режима работы системы замораживания, по сути, является задачей оптимального управления по заданным критериям – требуемым толщинам ЛПО и их средним температурам в совокупности слоев грунта, образующих интервал замораживания.

Управляющим воздействием здесь является холодопроизводительность морозильной системы, которую можно изменять (уменьшать) одним из трех технических способов [58, 114]:

1. Постепенное отключение отдельных холодильных установок.
2. Периодическая работа основной холодильной установки с остановками на интервал не более суток.
3. Установка дополнительной холодильной установки с холодопроизводительностью, необходимой на этапе пассивного замораживания.

Определение режима работы холодильной установки определяет эффективность замораживания, и, соответственно, затрат на электроэнергию для выработки «холода».

В настоящее время множество работ в литературе посвящено определению оптимальных режимов периодической работы основной холодильной установки, обеспечивающих требуемые параметры ЛПО при минимуме энергозатрат. Это актуально как с точки зрения повышения продуктивности геотермальных хранилищ скрытого тепла [82], так и с точки зрения долговременного искусственного замораживания [68, 99].

Большое внимание в литературе уделяется изучению прерывистого (периодического) искусственного замораживания. Известно, что стабильное поддержание температурного режима в так называемых «чистых комнатах» удастся осуществить не постоянным удержанием стабильной температуры внешних воздействий, а как раз их динамическим варьированием. Аналогичной следует ожидать и ситуацию с поведением породного массива.

В [133, 135] изучено влияние периодически меняющегося охлаждения на формирование морозного пучения. В работах [66, 69] рассмотрено использование периодического искусственного замораживания для повышения энергоэффективности систем замораживания. Однако периодическое замораживание технически описывается по-разному. В [69, 135] рассмотрен идеализированный случай, когда морозильная станция полностью отключается на некоторые промежутки времени. В [133] рассмотрен случай, когда температура рассола периодически меняется с интервалом в 1 день от -5°C . до -20°C , при этом морозильная станция продолжает работать. Как указано в [99], такое прерывистое замораживание не обеспечивает сохранения толщины ЛПО.

По этой причине в [68,71] была разработана концепция замораживания по требованию (FoD), в рамках которой прерывистая работа замораживающей станции перестала быть периодической. Переключение между режимами работы морозильной станции определялось достижением верхнего и нижнего пределов температуры в отдельных точках мерзлого грунта. Такой подход позволил с высокой степенью точности добиться сохранения толщины ЛПО.

Также было показано, что потенциальная экономия на этапе пассивного замораживания может составлять до 46%, что также согласуется с оценками экономии энергии, сделанными в [16].

В вышеперечисленных работах количество тепла, извлекаемого из грунта, контролируется методом прерывистого замораживания с постоянным или переменным периодом. Другим вариантом управления мощностью морозильной станции является плавное регулирование, рассмотренное в [117].

Конкретную временную зависимость, обеспечивающую поддержание фиксированной толщины ЛПО или ее минимальный рост, следует выбирать на основе математического моделирования с учетом специфики каждого из рассматриваемых слоев грунта. В этом смысле

математическое моделирование является неотъемлемым этапом оптимизации режима пассивного замораживания. Например, в [117] путем математического моделирования имитационной модели искусственного замораживания было показано, что для поддержания постоянной толщины ЛПО температура рассола в замораживающих трубах должна возрастать по закону $t^{-0,2}$, где t — время.

При этом важно понимать, что толщина ЛПО – не единственный регулируемый параметр. Несущая способность ЛПО зависит не только от ее толщины, но и от ее средней температуры [130]. Контроль средней температуры ЛПО при выборе режимов заморозки осуществляется значительно реже. Более общий подход к анализу состояния ЛПО заключается в контроле его несущей способности с учетом механического анализа [101] или косвенных геофизических методов [132].

Концепция FoD была введена по аналогии с известной концепцией вентиляции по требованию (VoD). Согласно определению, данному в [124], VoD – это такое расположение системы вентиляции, при котором свежий воздух направляется только в те части шахты или рудника, где он требуется, и в количестве, необходимом для ведения горных работ и поддержания комфортных условий в течение определенного периода времени.

Эта концепция реализуется в ряде этапов, которые обычно группируются от простого к сложному. Такие этапы разные авторы выделяют по-разному [129]. По нашему мнению, концепция FoD должна быть сформулирована в аналогичном ключе. Необходимо выделить основные принципы и этапы проведения FoD применительно к объекту – строящемуся подземному стволу или тоннелю. Это также одна из задач настоящего исследования.

1.4 Анализ методов расчета параметров ледопородного ограждения в замораживаемом обводненном породном массиве

Наличие математической модели поведения водонасыщенного породного массива наиболее точно и детально позволяет описать его поведение и произвести расчет параметров ЛПО вокруг строящихся шахтных стволов. В первую очередь это определение нестационарного температурного поля замораживаемого массива горных пород, позволяющее установить толщину и сплошность ЛПО.

Повторим, что замораживание обводненного породного массива является сложным физико-механическим процессом, включающим фазовые переходы.

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 [75]. Продолжение исследования данного вопроса в 1924 году позволило представить подробное обсуждение вопроса о замораживании воды в капиллярных системах [79]. В 1935 году был разработан метод расчета понижения температуры замерзания с учетом влияния отрицательного давления поровой воды [111].

Современные исследования показывают, что равновесное содержание незамерзшей воды зависит от температуры и имеет нелинейный характер [104].

Большое число последующих исследований посвящено изучению вопросов переноса влаги в замерзающих грунтах [74, 77, 78, 80, 87, 94, 96, 106]. Теоретические и экспериментальные исследования данных вопросов были систематизированы в работах [18, 22].

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 [84]. Гидродинамическая модель [84] объясняет некоторые основные особенности переноса воды и тепла при промерзании грунтов, но является относительно грубой для точного описания процесса миграции воды. Впоследствии эта модель получила развитие в других работах [121].

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 [92, 121]. Наиболее важной задачей при исследовании процессов переноса воды в замораживаемых грунтах является определение теплофизических и фильтрационно-капиллярных свойств грунта. Из-за ограниченного объема экспериментальных данных о свойствах мерзлых грунтов в разное время различными авторами в модели замораживания грунта вводились разнообразные упрощающие предположения [81, 83, 107].

В настоящее время подходы к описанию замораживания водонасыщенных горных пород и грунтов можно разделить на два класса: модели с полным превращением воды в лед [98, 105] и модели с учетом остаточной влаги [108, 134].

Исследования тепловых процессов в породных массивах криолитозоны подробно описаны в работах [29, 62]. Они включают расчеты температурного режима грунтов в вертикальных стволах с учетом параметров замораживающей системы и оценку несущей способности фундаментов в зависимости от температурных условий и физико-механических свойств пород.

Ранние методы исследования можно разделить на две группы: метод электротепловой аналогии [19, 33, 57] и решение квазистационарного уравнения теплопроводности в цилиндрической задаче Стефана [9]. В последние десятилетия применяется численное моделирование [34], позволяющее получать нестационарные решения для задач с множеством скважин и учитывающее различные физические процессы. Большое внимание уделяется изучению сложных термогидромеханических процессов, происходящих в замораживаемых грунтах и породах [90, 93].

Упрощенные аналитические методы расчета параметров ЛПО предоставляют оперативную оценку его состояния по сравнению с численными моделями двух- и трехмерного моделирования. Однако в таких методах часто не учитываются важные физические процессы, такие как нестационарность диффузионного переноса теплоты, конечная скорость фазового перехода и наличие скрытой теплоты фазового перехода, что может приводить к значительным погрешностям.

Использование более сложных моделей, учитывающих фазовые превращения влаги, миграцию поровой воды и другие процессы, также требует точности входных параметров модели. Перед началом строительства шахтных стволов на промышленной площадке проводятся инженерно-геологические изыскания, включающие описание строения геологического разреза, изучение гидрогеологических особенностей и физико-механических свойств образцов горных пород. Полученные данные о массиве горных пород используются для моделирования и определения параметров ЛПО.

Результаты расчетов термодинамических процессов в замораживаемом породном массиве напрямую зависят от физических свойств горных пород, использованных в модели. Однако лабораторные данные о теплофизических параметрах слоев породного массива часто обладают высокой погрешностью [5, 33, 72], что делает математические модели тепло- и массообмена в обводненных горных породах неэффективными для решения практических задач. Это обусловлено неоднородностью и анизотропностью породного массива, а также влиянием неучтенных технологических факторов на процесс искусственного замораживания. На сегодняшний день не существует математических методов, позволяющих точно учитывать физические свойства горных пород, что требует предварительной калибровки теплофизических

параметров слоев горных пород перед их использованием для прогнозирования параметров состояния ЛПО.

С учетом развития технологии термометрического контроля замораживаемого породного массива и вычислительной техники наиболее перспективным методом расчета параметров состояния ЛПО 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). Решение данной задачи применительно к искусственному замораживанию пород обстоятельно разобрано в работах [45, 53].

Вместе с тем, несмотря на заметный прогресс в области математического моделирования процессов тепломассопереноса в замораживаемых породных массивах, сравнительно меньшее внимание уделяется вопросу особенностей неравномерности тепловых полей в замораживающих колонках, которые сами по себе представляют сложную техническую систему, в которой происходит взаимодействие нисходящего и восходящего потоков рассола. В случае отклонения конструктивных параметров замораживаемых колонок от проектных значений тепловой поток от породного массива к ним и поле температур в породном массиве могут сильно меняться [116, 136].

Еще одним слабоизученным вопросом является выбор критериев достаточности степени промороженности породного массива при переходе на стадию пассивного замораживания, когда распределение температур в ЛПО сильно меняется относительно конца стадии активного замораживания, становится более пологим в окрестности контура замораживающих колонок. Используемые в настоящее время критерии (толщина ЛПО и его средняя температура) не всегда логичным образом увязываются между собой [50], а потому требуется проведение более глубоких исследований по анализу теплового и механического состояний ЛПО при сильном изменении режима работы замораживающей станции. Эти моменты исследуются в рамках настоящей работы.

1.5 Цель и задачи исследования

На основании изложенного выше сформулирована основная **цель работы:**

Разработать способ управления параметрами замораживающей станции и параметрами проходки на стадии пассивного замораживания и размораживания пород.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий перечень **задач работы:**

1. Провести детальные экспериментальные измерения распределений температуры по глубине контрольно-термических скважин при формировании, поддержании и оттаивании ледопородного ограждения вокруг строящихся стволов калийных рудников.
2. Разработать математическую модель системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь ствола» и параметризовать ее по данным экспериментальных измерений.
3. Провести многопараметрическое моделирование процессов искусственного замораживания пород для условий строящегося калийного рудника с целью выявления закономерностей временного изменения температурного поля породного массива на всех стадиях искусственного замораживания пород.
4. Разработать критерий оценки несущей способности ледопородного ограждения, применимый для различных стадий искусственного замораживания пород.
5. Разработать подход и принципы управления параметрами замораживающей станции на стадии пассивного замораживания и размораживания пород.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАМОРАЖИВАЕМЫХ ПОРОДАХ

Экспериментальные исследования, составляющие существенную часть работы в целом, позволяют не только получить фактические данные для теплофизического моделирования, но и проанализировать на их основе характер протекания различных естественных и техногенных процессов, определяющих тепломассоперенос в массиве горных пород. По времени и месту проведения эксперимента исследования можно разделить на две группы: (а) предварительные — получаемые на предпроектной стадии изысканий, и (б) текущие — получаемые непосредственно в процессе искусственного замораживания.

К первой группе относятся лабораторные исследования керна горных пород из контрольно-стволовых и других скважин, расположенных на участке строительства шахтных стволов.

Ко второй — измерения температуры массива горных пород до и непосредственно в процессе искусственного замораживания и размораживания.

Начнем с лабораторных исследований образцов керна горных пород.

Лабораторные исследования образцов керна, необходимые для теплофизического моделирования и контроля состояния ледопородного ограждения, можно разделить на четыре группы по определяемым признакам: (1) физические свойства, описывающие состояние породы и взаимодействие ее компонентов, (2) теплофизические параметры, обуславливающие способность породы к аккумуляции и передаче теплоты и (3) механические характеристики, определяющие способность породы сопротивляться изменению объема и формы в результате силового воздействия. Последние подразделяются на прочностные – определяют способность породы сопротивляться разрушению, и деформационные – определяют способность породы сопротивляться развитию деформаций [3]. Некоторые параметры определяются только в естественном, незамороженном состоянии, другие – при положительных и отрицательных температурах породы или в процессе изменения агрегатного состояния воды в ее порах.

В группе (1) физических свойств в естественном состоянии породы определяются:

(1.а) общая плотность породы и ее твердых частиц;

(1.б) емкостные свойства – пористость и коэффициент пористости породы;

в естественном состоянии и мерзлом, при заданной последовательности отрицательных температур:

(1.в) влажностные свойства – естественное весовое влагосодержание породы и остаточное количество незамороженной воды в порах.

В группе (2) теплофизических параметров в естественном состоянии породы и при единственном значении отрицательной температуры определяются:

(2.а) удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности;

в процессе смены агрегатного состояния воды в породе:

(2.б) температура начала ее кристаллизации (замерзания).

Характеристики (1) и (2) групп непосредственно используются в математическом расчете температурного состояния замороженного массива горных пород при контроле ЛПО в виде параметров математической модели.

Эксплуатационные свойства ЛПО напрямую определяются его физико-механическими и фильтрационно-емкостными характеристиками. Соответствие геомеханическим критериям обеспечивает целостность стенок ствола в процессе проходки и технологически допустимую величину их деформации, т. е. смещения внутрь к центру ствола. Соответствие гидравлическим критериям определяет степень противодействия движению воды через порово-трещинное пространство замороженных пород под действием гидростатического давления (условие «нулевой проницаемости»). Считается, что геомеханические критерии являются более жесткими, и если ЛПО удовлетворяет им, то условие «нулевой проницаемости» выполняется автоматически. Следовательно, отсутствует необходимость оценки фильтрационных свойств мерзлых пород в лабораторных условиях для последующего расчета способности ЛПО противостоять просачиванию подземных вод.

Механические характеристики группы (3) делятся на прочностные и деформационные. Первые определяют способность ЛПО сохранять целостность под воздействием внешней нагрузки, а вторые – его способность сохранять свою форму, поскольку мерзлая порода обладает текучестью (способностью деформироваться без разрушения) под давлением [12, 13].

Несмотря на то, что механические характеристики породы не используются для параметризации теплофизической модели, как параметры группы (1) и (2), через взаимосвязь с температурой они соотносят температурное состояние ЛПО с его несущей способностью и поэтому крайне важны для рассмотрения в данном разделе работы.

Таким образом, в группе (3) в естественном состоянии породы определяют:

(3.а) их прочностные свойства – условно-мгновенные значения предела прочности на одноосное сжатие, структурное сцепление и угол внутреннего трения.

При одном, реже (с целью оптимизации процессов) нескольких отрицательных значениях температуры определяют:

(3.б) прочностные характеристики – условно-мгновенные и длительные значения предела прочности на одноосное сжатие, структурного сцепления и угла внутреннего трения;

(3.в) деформационные характеристики – коэффициенты уравнения аппроксимации результатов испытаний пород на ползучесть: коэффициент упрочнения (нелинейности по напряжениям), коэффициент нелинейной деформации и коэффициент нелинейности по времени.

2.1 Общие сведения о методике лабораторных исследований керна

Горные породы, подвергаемые искусственному замораживанию, часто являются рыхлыми или слабосцементированными. Весьма сложно извлечь из скважины образец такой породы, обладающий ненарушенной структурой, и сохранить его при транспортировке. Породы, которые извлекались нарушенными, подготавливались для испытаний специальным способом.

В процессе предварительных испытаний из наиболее однородных и целых кернов для определения объемной массы и влагосодержания в ненарушенном состоянии вырезались образцы правильной цилиндрической формы. В дальнейшем керны одного горизонта измельчались с помощью дробления в пасты, из которых формовалось необходимое количество опытных образцов. При подготовке опытных образцов контролировалось влагосодержание исходной пасты, и в случае необходимости производилось ее доувлажнение. После тщательного перемешивания подготовленные пасты помещались в герметичные емкости и термостатировались при заданной положительной температуре в течение суток.

В ранних исследованиях [39, 40] было установлено, что при соответствии влажности и плотности кернов горных пород ненарушенного сложения и образцов, сформированных из паст горных пород тех же литологических разностей, результаты испытаний имели отличие, не превышающее соответствующей стандартной ошибки испытаний. Образцы породы с ненарушенной в процессе извлечения и транспортировки структурой подлежали изучению без превращения в пасту.

Формовка образцов производилась при помощи калиброванных цилиндрических кассет различного диаметра и высоты для разных типов испытаний. Заполненные пастой кассеты устанавливались под винтовой пресс для создания уплотняющей нагрузки до максимального уплотнения образца без отжатия из него влаги, поскольку отжатие означало бы падение влагосодержания ниже естественного значения. При такой нагрузке образец выдерживался в течение 1 часа.

Перед испытаниями в мерзлом состоянии образцы подвергались быстрому замораживанию в морозильной камере, затем выпрессовывались из кассет и выдерживались при температуре испытаний не менее 6 часов.

Определение коэффициентов теплопроводности производилось в термостатируемой камере при помощи специального устройства, разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси, при положительной температуре, близкой к температуре породы в естественном залегании, и при отрицательной – близкой к средней температуре ЛПО. Например, $+10^{\circ}\text{C}$ и -10°C .

Определение удельной теплоемкости образцов при аналогичных температурах, а также количества незамерзшей воды в зависимости от температуры мерзлой породы и температуры начала замерзания воды в порах проводилось с помощью калориметрической установки, разработанной в Институте природопользования НАН Беларуси.

Исследование прочностных характеристик горных пород в мерзлом состоянии производилось при помощи устройства осевого нагружения, входящего в автоматизированный испытательный комплекс приборов «АСИС» производства ООО НПП «Геотек» (Россия), а при определении сдвиговых характеристик — согласованного с ним устройства двухплоскостного среза АНБ-760А, разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси.

Реологические характеристики, характеризующие деформируемость породы под длительной нагрузкой в мерзлом состоянии, определялись при помощи комплекса «АСИС» с регистратором, позволяющим отслеживать в процессе ступенчатого нагружения образца его вертикальную и радиальную (поперечную) деформации.

Следует отметить, что исследованию длительных значений прочностных (предела прочности на одноосное сжатие, структурного сцепления и угла внутреннего трения) и реологических характеристик предшествовали испытания, проводимые с целью определения условно-мгновенных значений тех же сдвиговых характеристик и предела прочности на одноосное сжатие. В длительных испытаниях образец находился под постепенно увеличивающейся нагрузкой с шагом $0,1 F_{max}$, то есть 10% от максимальной нагрузки F_{max} , при которой ранее наблюдалось его разрушение в испытаниях на определение условно-мгновенного значения предела прочности на одноосное сжатие или сдвиговых характеристик. Предварительными испытаниями установлено, что длительность каждого этапа нагружения (т. е. удержания при одном значении приложенной нагрузки), превышающая 4 часа, не оказывает существенного влияния на определение параметров ползучести.

2.2 Краткие сведения о литологии геологического разреза на участках строительства исследованных шахтных стволов и их конструктивных элементах

Помимо основной серии лабораторных исследований пород, в обязательном порядке выполненных на предпроектных стадиях строительства шахтных стволов, при непосредственном участии автора было выполнено дополнительное исследование, в рамках которого определялись наиболее типичные (типовые) литологические разности, присутствующие повсеместно в интервале водоносных комплексов на территории Старобинского и Петриковского месторождений калийных солей, т. е. тех осадочных горных пород, которые подвергаются искусственному замораживанию в процессе строительства ствола, с последующим определением наиболее полного набора требуемых характеристик [41].

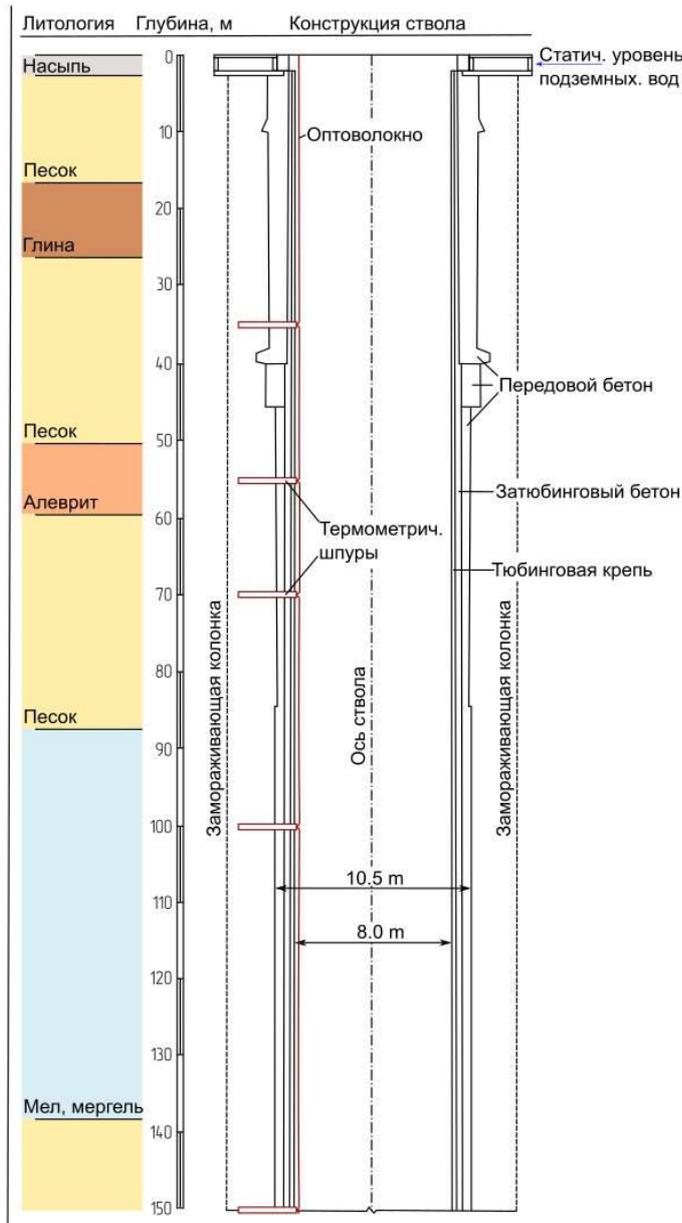
Петриковское месторождение калийных и каменной солей в геологическом отношении расположено в Припятском калиеносном бассейне на западе Припятского прогиба, территориально – на юге Республики Беларусь. Глубина залегания кровли соленосной толщи в пределах участка строительства Петриковского ГОК изменяется от 487 м до 556 м. Искусственное замораживание горных пород при строительстве шахтных стволов ГОК производилось до глубины 275 м. Сводная укрупненная литологическая колонка с элементами крепления шахтного ствола представлена на рисунке 2.1.

Старобинское месторождение калийных солей расположено севернее Петриковского, также является частью Припятского калиеносного бассейна, и по занимаемой площади считается крупнейшим в Европе. Соленосная часть разреза представлена каменной солью, сильвинитом и карналлитом. Глубина залегания кровли соленосной толщи в пределах строящегося Дарасинского рудника составляет около 470 м. Искусственное замораживание горных пород при строительстве шахтных стволов производилось до глубины 185,0 м. Укрупненные литологические колонки по каждому участку строительства шахтных стволов с элементами их конструкции представлены на рисунке 2.2.

Один из шахтных стволов Дарасинского рудника, скиповой, оказался заложен в условиях палеодолины, осложняющей геологическое строение участка работ. Палеодолина до глубины ~143 м сложена нестратифицированными смешанными отложениями терригенных пород: песка, суглинка, супеси и глин. В ложе палеодолины присутствуют большое количество крупной и средней гальки, глыбы мела писчего, крупные углефицированные растительные остатки. Геологическое строение участка строительства скипового ствола сыграло значительную роль в формировании и поддержании ЛПО, что будет описано ниже.

а)

СКИПОВОЙ СТВОЛ



б)

КЛЕТЕВОЙ СТВОЛ

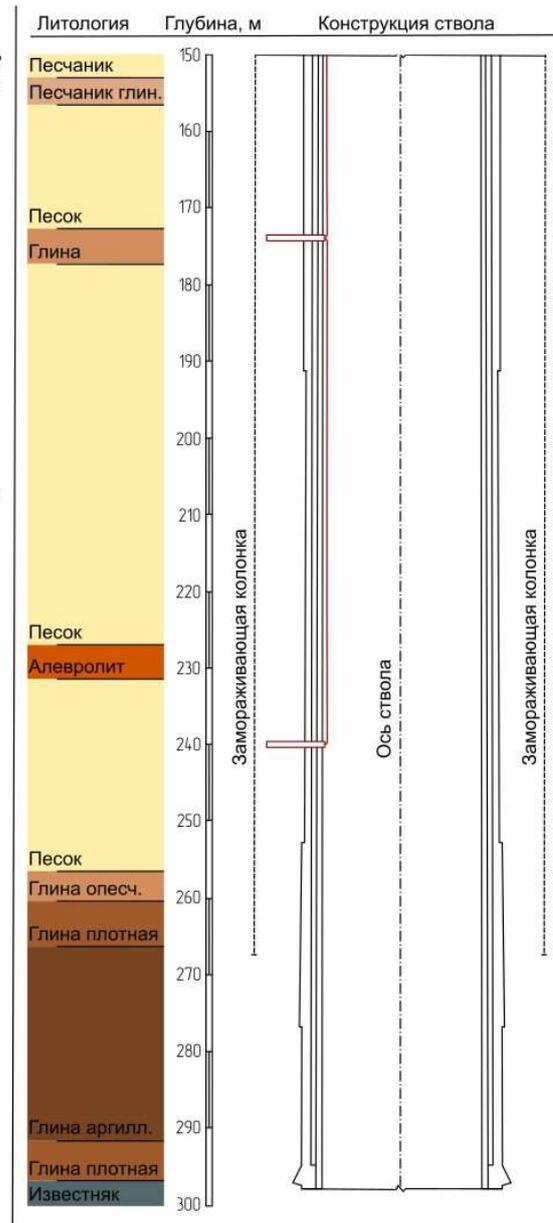
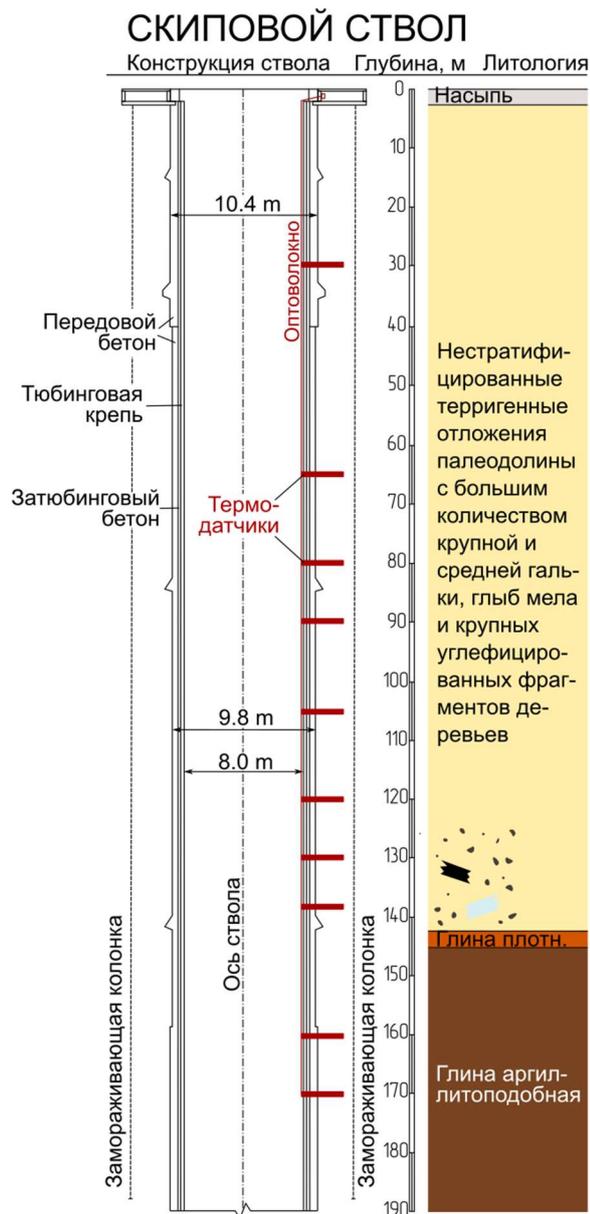


Рисунок 2.1 – Сводная литологическая колонка и конструкция строящихся шахтных стволов Петриковского ГОК

В интервалах замораживаемых пород присутствуют водоносные горизонты. На Петриковском месторождении до глубины 275 м встречаются водонасыщенные кварцевые пески с плавунными свойствами; суммарный расчётный водоприток в ствол достигает 2524 м³/ч. На Дарасинском руднике в зоне замораживания встречаются проницаемые слои глинистого песка, песчаников и супесей, а расчётный суммарный водоприток в ствол равен около 2040 м³/ч.

а)



б)

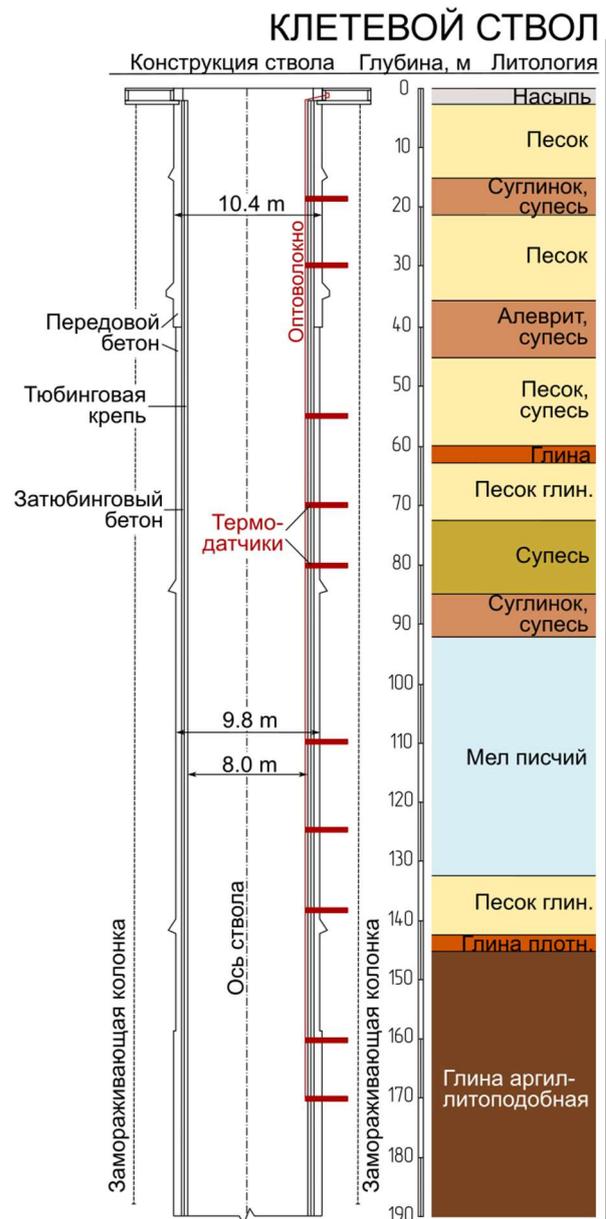


Рисунок 2.2 – Литологические колонки и конструкция строящихся шахтных стволов Дарасинского рудника

Определение типовых литологических разностей и исследование предельно-длительных значений их сдвиговых характеристик и параметров ползучести приведены ниже.

В результате анализа геологических колонок контрольно-стволовых и гидрогеологических скважин на участке Дарасинского рудника [40, 42] выделены 7 типовых горных пород, для которых с учетом достаточности кернового материала была сформирована выборка образцов, подвергаемых в дальнейшем геомеханическим испытаниям (рисунок 2.3).

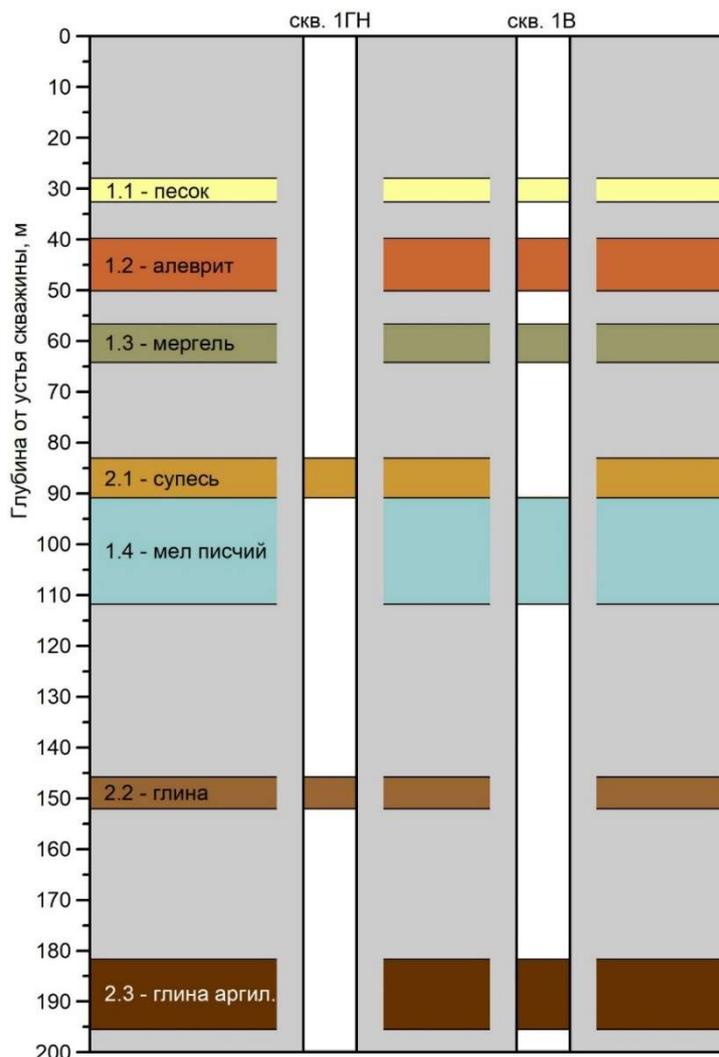


Рисунок 2.3 – Типовые литологические разности с привязкой к скважине и интервалу глубин извлечения керна в пределах строительной площадки Дарасинского рудника

Четыре основные литологические разности:

1.1. песок — скважина 1в, интервал глубин 27,9-32,6 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,05$ °С;

1.2. алевроит — скважина 1в, интервал глубин 39,7-50,1 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,07$ °С;

1.3. мергель — скважина 1в, интервал глубин 56,6-64,2 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,15$ °С;

1.4. мел песчий — скважина 1в, интервал глубин 90,7-111,8 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,11$ °С;

Три дополнительные литологические разности:

2.1. супесь — скважина 1гн, интервал глубин 83,0-90,8 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,11$ °С;

2.2. глина — скважина 1гн, интервал глубин 145,8-152,0 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,82$ °С;

2.3. глина аргиллитоподобная — скважина 1в, интервал глубин 181,6-195,5 м, температура начала замерзания воды в породе $-0,98$ °С.

Выборка не претендует на полную репрезентативность для всей территории Республики Беларусь, но отражает генеральные литологические особенности, поскольку содержит основные типы осадочных горных пород, встречающиеся в верхней части геологического разреза Старобинского и Петриковского калийных месторождений.

Исследования образцов горных пород производились при следующих значениях температуры:

- за естественную положительную принята температура $+10$ °С;
- удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности мерзлой породы – при температуре -10 °С;
- геомеханические исследования мерзлых пород – при серии отрицательных значений температуры: -2 °С, -4 °С, -6 °С, -10 °С, -15 °С, -20 °С, -25 °С.

Результаты исследований в обобщенном виде представлены в таблице 2.1, а некоторые из них графически – на рисунках 2.4-2.7.

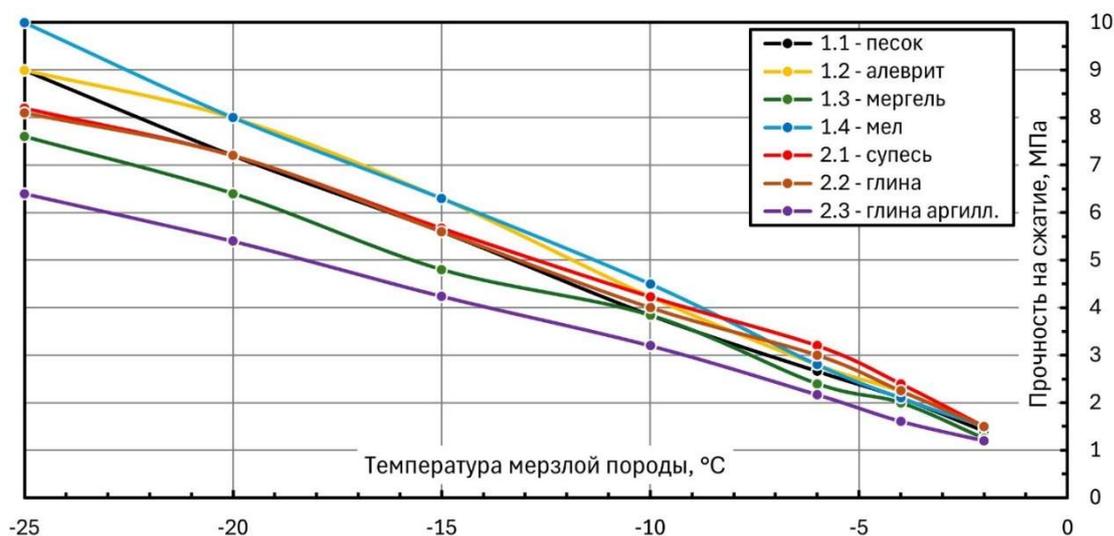


Рисунок 2.4 – Зависимость предельно-длительных значений предела прочности на одноосное сжатие мерзлых горных пород от температуры

Таблица 2.1 – Обобщенные данные по деформационно-прочностным и теплофизическим характеристикам мерзлых горных пород, полученные в испытаниях при различных отрицательных температурах

№	Порода, скважина, интервал глубин, м	1. Плотностные и влажностные характеристики		2. Теплофизические характеристики				3. Геомеханические характеристики										
		Плотность породы, кг/м ³	Естественное весовое влагосодержание, кг/кг	Температура начала заморзания воды в породе, °С	Температура испытания образца, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Температура испытания образца, °С	Условно-мгновенные значения			Предельно-длительные значения			Параметры ползучести *			
									Прочность на одноосное сжатие, МПа	Структурное сцепление, МПа	Тангенс угла внутреннего трения, усл. ед.	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Структурное сцепление, МПа	Тангенс угла внутреннего трения, усл. ед.	A ₀ , МПа	m, усл. ед.	a, усл. ед.	
1.1	Песок скв. 1в, 27,9-32,6	2140	0,124	-0,05	+10	1147	2,80	0	0,30	0,14	0,39	—	—	—	—	—	—	—
								-2	3,54	1,84	0,46	1,40	0,90	0,45	12,77	0,56	0,152	
								-4	4,76	2,59	0,47	2,10	1,40	0,46	7,39	0,50	0,150	
								-6	5,82	3,15	0,48	2,66	1,69	0,46	13,07	0,46	0,140	
					-10	895	3,92	-10	8,10	3,95	0,50	3,84	2,00	0,48	19,09	0,48	0,138	
								-15	10,99	4,83	0,53	5,60	2,55	0,50	28,70	0,45	0,134	
								-20	13,00	6,02	0,55	7,20	3,20	0,53	35,30	0,45	0,120	
								-25	14,60	7,20	0,58	9,00	3,89	0,56	39,93	0,45	0,104	
1.2	Алеврит скв. 1в, 39,7-50,1	2120	0,160	-0,07	+10	1235	2,14	0	0,28	0,12	0,18	—	—	—	—	—	—	—
								-2	2,83	1,47	0,36	1,50	0,65	0,17	8,37	0,62	0,140	
								-4	3,92	1,85	0,35	2,24	0,88	0,17	9,87	0,53	0,130	
								-6	4,62	2,21	0,35	2,80	1,17	0,17	10,04	0,46	0,121	
					-10	1005	2,85	-10	6,50	3,07	0,36	4,23	1,60	0,23	11,56	0,40	0,130	
								-15	9,00	3,93	0,36	6,30	2,36	0,24	16,41	0,38	0,131	
								-20	11,20	4,82	0,43	8,00	2,90	0,26	21,50	0,38	0,125	
								-25	12,35	5,74	0,53	9,00	3,70	0,28	24,67	0,38	0,121	
1.3	Мергель скв. 1в, 56,6-64,2	2090	0,180	-0,15	+10	1245	1,81	0	0,25	0,12	0,06	—	—	—	—	—	—	
								-2	2,34	1,16	0,10	1,25	0,60	0,08	4,55	0,53	0,170	
								-4	2,92	1,52	0,12	2,00	0,76	0,10	5,84	0,38	0,160	
								-6	3,72	1,87	0,13	2,40	1,02	0,12	6,14	0,34	0,155	
					-10	1019	2,47	-10	5,20	2,64	0,14	3,84	1,45	0,16	9,59	0,34	0,150	
								-15	7,09	3,40	0,23	4,80	1,90	0,19	11,21	0,33	0,146	
								-20	8,95	4,39	0,29	6,40	2,40	0,20	13,46	0,32	0,150	

								-25	10,50	5,37	0,31	7,60	3,00	0,22	15,87	0,32	0,152
1.4	Мел скв. 1в, 90,7-111,8	1910	0,260	-0,11	+10	1524	1,55	0	0,50	0,23	0,12	—	—	—	—	—	—
								-2	2,90	1,63	0,17	1,50	0,84	0,09	8,13	0,57	0,112
								-4	3,86	2,05	0,16	2,40	1,12	0,10	11,43	0,53	0,110
								-6	4,45	2,45	0,14	3,20	1,34	0,16	9,40	0,39	0,11
					-10	1092	2,26	-10	5,70	3,11	0,20	4,23	1,70	0,21	13,92	0,41	0,110
								-15	7,45	3,82	0,27	5,67	1,96	0,22	16,97	0,38	0,115
								-20	9,24	4,74	0,29	7,20	2,50	0,26	18,11	0,36	0,096
								-25	11,10	5,68	0,33	8,20	2,94	0,28	20,46	0,34	0,076
2.1	Супесь скв. 1гн, 83,0-90,8	2130	0,140	-0,11	+10	1355	2,36	0	0,37	0,17	0,15	—	—	—	—	—	—
								-2	3,18	1,71	0,33	1,50	0,86	0,30	8,04	0,44	0,130
								-4	3,90	2,20	0,35	2,10	1,30	0,32	12,77	0,45	0,120
								-6	4,77	2,67	0,36	2,80	1,60	0,34	14,91	0,42	0,106
					-10	1042	3,27	-10	6,90	3,37	0,38	4,50	1,86	0,36	20,79	0,43	0,100
								-15	9,86	4,45	0,39	6,30	2,27	0,37	35,06	0,43	0,095
								-20	12,73	5,58	0,42	8,00	3,00	0,40	33,48	0,43	0,110
								-25	14,3	6,74	0,44	10,00	3,80	0,41	41,48	0,43	0,123
2.2	Глина скв. 1гн, 145,8-152,0	1980	0,270	-0,68	+10	1511	1,16	0	0,62	0,30	0,06	—	—	—	—	—	—
								-2	3,58	1,46	0,06	1,50	0,72	0,08	11,95	0,80	0,160
								-4	3,83	1,80	0,12	2,25	0,94	0,10	7,67	0,50	0,160
								-6	4,35	2,13	0,16	3,00	1,22	0,14	8,61	0,43	0,158
					-10	1206	1,51	-10	5,80	3,10	0,20	4,00	1,60	0,16	11,57	0,33	0,157
								-15	7,87	4,07	0,24	5,60	2,06	0,19	15,44	0,32	0,156
								-20	9,52	4,90	0,35	7,20	2,75	0,23	15,10	0,31	0,160
								-25	11,82	5,70	0,41	8,10	3,55	0,25	16,81	0,31	0,162
2.3	Глина аргилли- подобная скв. 1в, 181,6-195,5	1880	0,290	-0,65	+10	1308	0,88	0	0,60	0,30	0,04	—	—	—	—	—	—
								-2	2,11	1,08	0,05	1,20	0,56	0,07	3,74	0,50	0,11
								-4	2,60	1,47	0,07	1,61	0,84	0,08	4,49	0,42	0,140
								-6	3,29	1,84	0,08	2,17	1,15	0,10	5,68	0,40	0,150
					-10	1145	1,21	-10	4,80	2,63	0,16	3,20	1,53	0,12	13,85	0,40	0,150
								-15	6,91	3,47	0,28	4,24	2,07	0,17	17,08	0,39	0,154
								-20	9,24	4,46	0,32	5,40	2,58	0,18	22,92	0,39	0,172
								-25	11,23	5,41	0,34	6,40	3,10	0,22	28,42	0,39	0,188

* A_0 – коэффициент нелинейной деформации породы; α – коэффициент нелинейности по времени; m – коэффициент упрочнения породы.

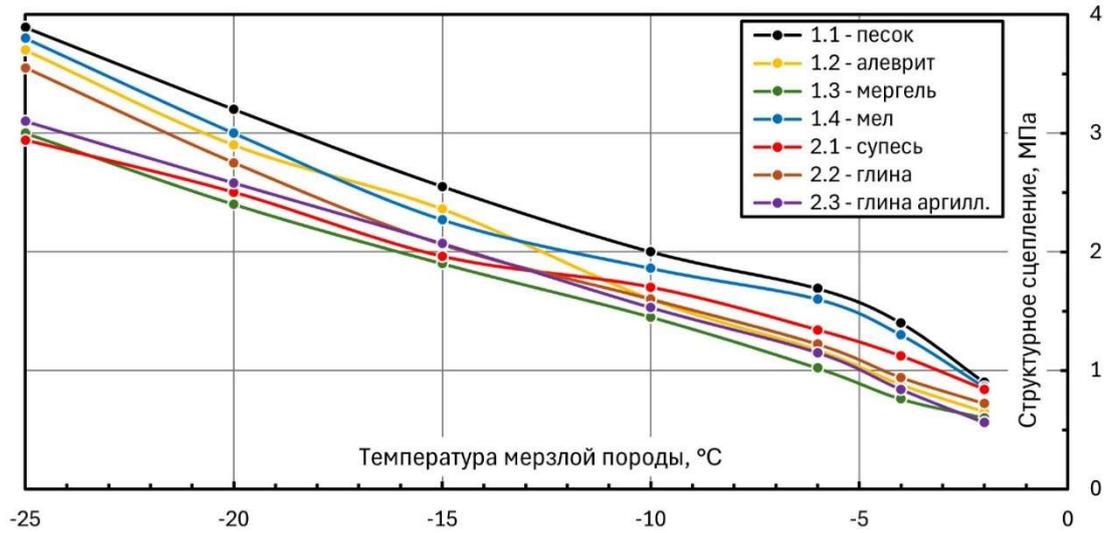


Рисунок 2.5 – Зависимость предельно-длительных значений структурного сцепления мерзлых горных пород от температуры

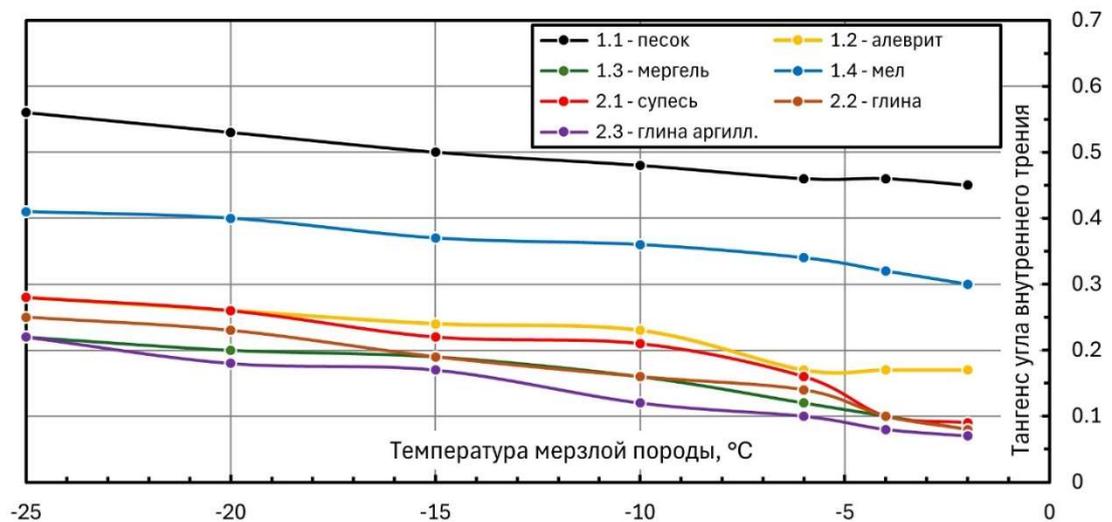


Рисунок 2.6 – Зависимость тангенса угла внутреннего трения мерзлых горных пород от температуры

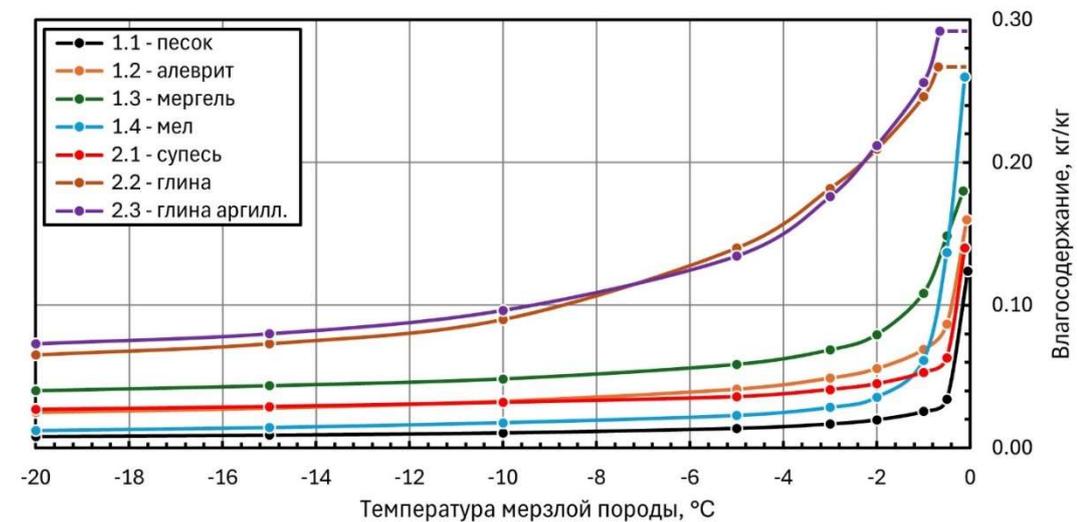


Рисунок 2.7 – Зависимость количества незамерзшей воды в мерзлой горной породе от температуры

Удельные теплоемкости и теплопроводности пород представлены в таблице выше для двух температур (+10 °С и -10 °С), в то время как прочностные и реологические свойства пород – при восьми различных температурах в диапазоне от нуля до -25 °С. Длительные прочностные и реологические характеристики пород при температуре 0 °С не были получены, поскольку при данной температуре образцы оставались недостаточно замороженными, сохраняли рыхлую структуру и разрушались в процессе испытаний.

Анализ результатов лабораторных испытаний пород показал, что прослеживается линейная тенденция к повышению их прочностных характеристик с понижением температуры. В среднем (медианном) выражении предельно-длительные значения предела прочности на одноосное сжатие для мерзлых пород выборки в 1,57 раз, структурного сцепления – в 1,85 раз, тангенса угла внутреннего трения – в 1,18 раз ниже их условно-мгновенных аналогов.

В целом прослеживается следующая тенденция: при температуре породы -2°С снижение предельно-длительных значений предела прочности на одноосное сжатие и структурного сцепления относительно условно-мгновенных выше медианного (до ~2 раз), а начиная с температуры -4°С и ниже – соответствует ему. Обусловлен данный факт прочностными свойствами двухфазного порового заполнителя: вода в жидкой фазе ослабляет структурные связи между частицами породы, снижая их трение, тогда как в твердой фазе в виде льда – является хорошим связующим («цементом»), повышающим прочность на сжатие и сопротивление сдвигу. Фактически при замораживании несцементированная порода переходит в разряд сцементированных, механические характеристики которых во многом определяются свойствами вяжущего материала, в настоящем случае – льда.

В диапазоне от температуры начала замерзания до -4°С в большинстве исследуемых пород происходит кристаллизация большей части свободной воды в порах, что можно отметить из зависимостей, представленных на рисунке 2.7. Первоначально кристаллизуется гравитационная и капиллярная вода, заполняющая относительно крупные поры. Пленочная вода преимущественно замерзает за пределами указанного диапазона температур, а прочносвязанная (гигроскопическая) – составляет остаточную массу незамерзшей воды даже при температурах ниже -20°С.

Водоледная смесь при отрицательных температурах, близких к температуре начала замерзания, является более текучей, чем при более низких температурах, что и обуславливает дополнительную добавку к снижению общей прочности горной породы при длительных испытаниях.

Наихудшую способность к замораживанию воды демонстрируют глины. Большая часть твердых частиц в их составе имеет пылеватый характер, а вода между ними находится преимущественно в пленочном и прочносвязанном состоянии (рисунок 2.7). В общем увеличение доли глинистых частиц (глинистого цемента) в мелкообломочных породах приводит к менее резко выраженному (более плавному) замерзанию воды при понижении температуры и к увеличению ее незамерзшей доли. Даже находясь в сильно замороженном состоянии, породы, имеющие в своем гранулометрическом составе значительное количество глинистого материала, обладают повышенной пластичностью (деформируемостью) относительно менее заглинизированных разностей. Проявляется значительное влияние незамерзшего вяжущего материала (глинистые частицы + связанная вода), заполняющего пространство между более крупными твердыми частицами.

Относительное значение коэффициента нелинейной деформации горных пород демонстрирует тенденцию к снижению с понижением температуры испытаний образца, т.е. чем ниже температура мерзлой породы, тем большим сопротивлением к изменению линейных размеров и формы она обладает (рисунок 2.8).

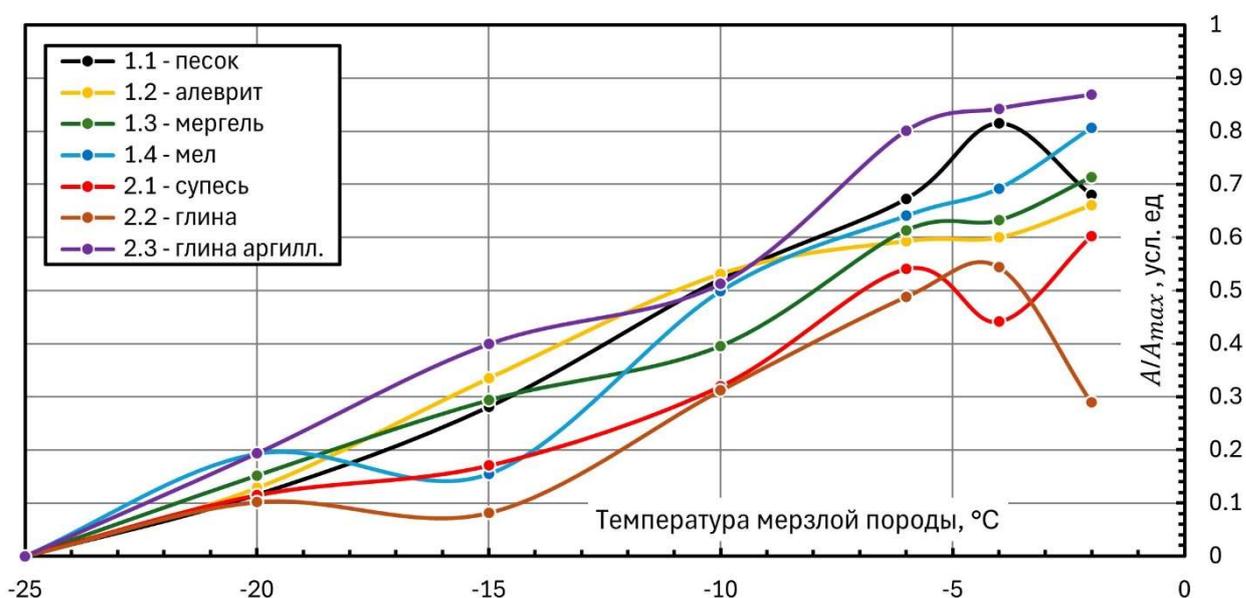


Рисунок 2.8 – Относительное снижение коэффициента нелинейной деформации с понижением температуры породы

Приведенный анализ результатов лабораторных исследований представленной выборки горных пород дает отчетливое понимание диапазона изменения прочностных или деформационных свойств в зависимости от температуры породы и длительности приложения внешней нагрузки. Учитывая, что распределение температур внутри ЛПО всегда имеет неравномерный характер, данные зависимости должны и будут использоваться в расчетах несущей способности ЛПО с учетом времени крепления стенки ствола.

2.3 Технология распределенных измерений температуры массива горных пород в естественном залегании в процессе их искусственного замораживания

Измерения температуры пород в их естественном состоянии до начала искусственного замораживания позволяют оценить количество теплоты, которое требуется отвести из массива для создания ЛПО заданных размеров, и величину земных теплопритоков к его будущей внешней границе. Естественная температура породы служит в качестве одного из граничных условий в математической модели для численного моделирования процессов теплопереноса в системе «замораживающие колонки – породный массив – шахтный ствол». Ее значения становятся известными из результатов термометрии в контрольно-стволовых скважинах, в других скважинах на участке строительства шахтных стволов, например, гидрогеологических, гидронаблюдательных (ГН) и контрольно-термических (КТ) (рисунок 2.9). Здесь и далее обозначение КТ1.# и КТ2.#, где под # понимается номер скважины, он применяется для ее отнесения к участку строительства скипового ствола – участок №1 или клетового – участок №2 Дарасинского рудника, если эта принадлежность скважин не установлена в тексте напрямую или это необходимо для упрощения изложения. Так скважина КТ1.1 соответствует скважине КТ1 скипового ствола, а КТ2.1 – скважине КТ1 клетового.

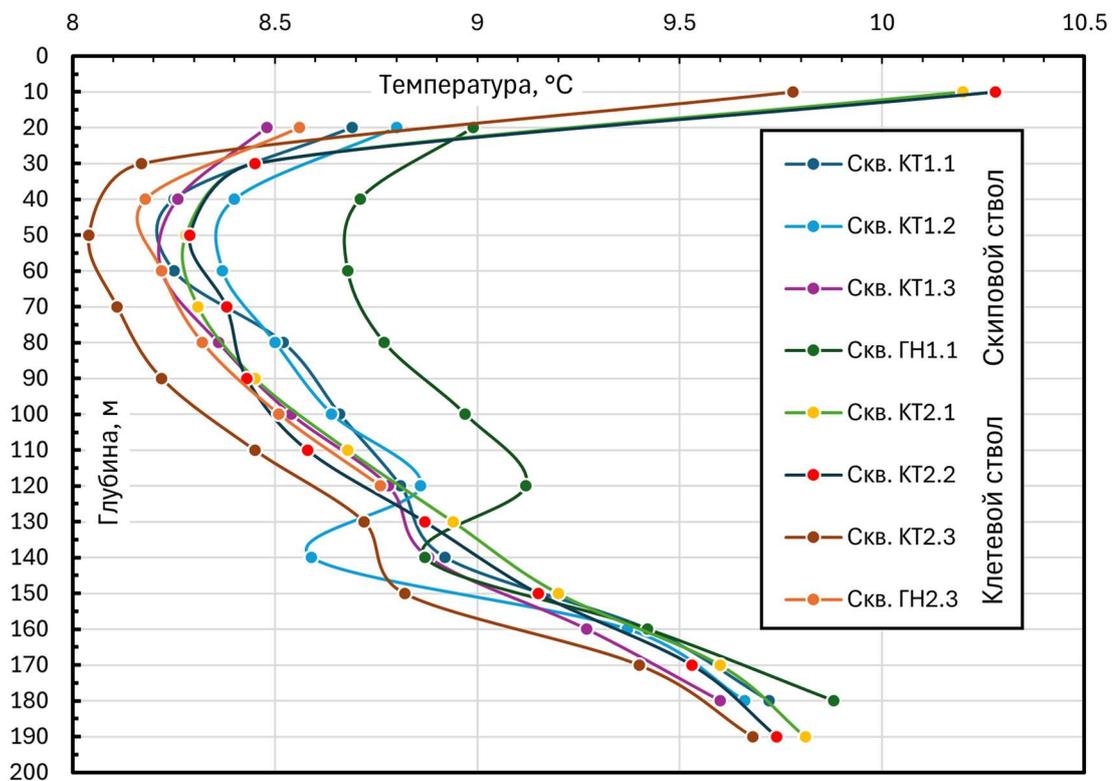


Рисунок 2.9 – Распределение естественной температуры горных пород с глубиной по данным термометрии в КТ и ГН скважинах на участках строительства шахтных стволов Дарасинского рудника до начала искусственного замораживания

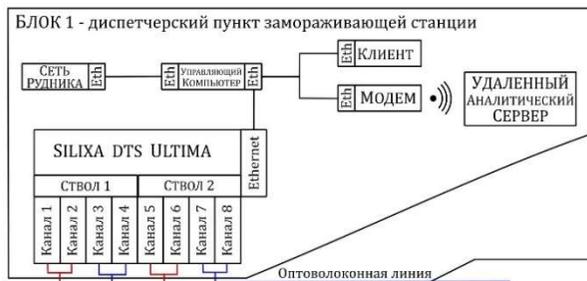
Измерения температуры в КТ скважинах до начала искусственного замораживания выполняются в обязательном порядке перед монтажом измерительного оптоволоконного кабеля с целью последующей калибровки показаний оптоволоконной системы термометрического контроля состояния ЛПО. Замеры производились скважинными термометрами, например, типа ЛИТАН А-20.60, имеющим погрешность не более $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, на спуске или подъеме с обязательным отстаиванием в точке замера. Время отстаивания определяется временем стабилизации показаний прибора и в жидкой среде не превышает 5-15 минут, в зависимости от перепада температур между предыдущей и текущей точками замера.

Измерения температуры массива в процессе искусственного замораживания на участках строительства шахтных стволов Петриковского ГОК и Дарасинского рудника производились при помощи оптоволоконной системы термометрического контроля, основные элементы которой представлены на рисунке 2.10. Структуру системы распределенных измерений температуры (DTS – distributed temperature sensing, англ.) составляли три блока, один управляющий и два измерительных, связанных с ним кабельным каналом.

Управляющий блок требует постоянного подключения к источнику электропитания и защите от агрессивного влияния внешней среды, поэтому располагался в диспетчерской замораживающей станции. Блок включает в себя DTS регистратор оптического сигнала с оптоволоконных линий, управляющий компьютер, клиентский компьютер, с которого диспетчер замораживающей станции может в любое время проанализировать текущие данные о температурах в КТ скважинах, и GSM-модем для беспроводной передачи данных на удаленный аналитический сервер, где осуществлялась их постобработка и интерпретация. Посредством кабельного соединения управляющий блок может быть подключен к сети рудника для прямой передачи необработанных данных удаленным пользователям.

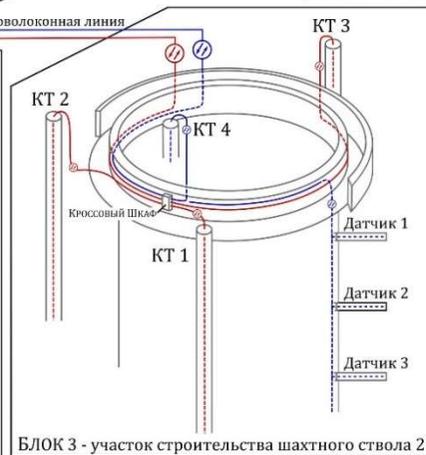
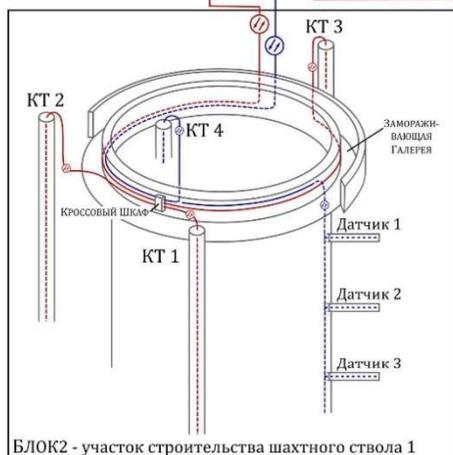
Магистральные оптоволоконные кабели были проложены от DTS регистратора до кроссовых шкафов на участках строительства шахтных стволов, расположенных в галерее замораживающих колонок. В кроссовом шкафу магистральное оптоволокно соединено с измерительным, проложенным в КТ скважины. Контрольно-термическая скважина, аналогично замораживающей, обсажена трубной колонной (термометрическая колонка), герметично запаянной в забое, и заполнена незамерзающей теплопроводящей жидкостью – хладоносителем, циркулирующим в замораживающих колонках, в качестве которого выступает рассол CaCl_2 , реже – рассолы других солей или сложные по составу растворы.

Термостатированный шкаф с DTS регистратором Silixa Ultima, управляющим компьютером и блоком бесперебойного питания.



Гидронаблюдательная скважина в контуре проходки ствола, оборудованная измерительным оптоволоконным кабелем. Ликвидирована до начала проходки.

Кроссовый шкаф с распаечной коробкой, закрепленный на стене замораживающей галереи.



Оптоволоконный датчик, установленный в крепи ствола для измерения температуры породы за крепью при подготовке к тампонажу.



Контрольно-термическая скважина, оборудованная измерительным оптоволоконным кабелем. Оголовок открыт. Производится верификация показаний системы путем сопоставления с данными скважинного термометра.



Тепловизионный снимок мерзлой породы в забое и замороженной стенки ствола до ее крепления. Дополнительный контроль равномерности промерзания массива в процессе проходки.

Рисунок 2.10 – Принципиальная схема оптоволоконной системы термометрического контроля состояния ЛПО строящегося шахтного ствола

Фактически оптоволокно «производит измерения» температуры теплопроводящей жидкости в колонке. Процессы замораживания являются медленными, тепловая инерция мала. Жидкость в КТ скважине находится в стабильном состоянии, не перемешивается принудительно, а влияние естественной конвекции мало, поэтому она принимает температуру породы, прилегающей к колонке.

DTS оборудование Silixa Ultima, которое использовалось в качестве регистратора на Петриковском ГОК и Дарасинском руднике, обеспечивает двухканальный режим измерений, где один канал является прямым, а второй обратным. Оптоволоконная линия, проходящая через КТ скважины, замкнута и подключена к обоим каналам регистратора. Когерентный импульс света от лазера через первый канал запускается по линии в прямом направлении и затем повторно через второй канал в обратном. Обратное рассеянное излучение каждого импульса регистрируется первым каналом в первом случае и вторым – во втором. Таким образом, за короткий промежуток времени порядка нескольких секунд на обработчик поступают два полезных сигнала, несущих одинаковую информацию о температурах оптоволоконна, различающихся степенью затухания. Первый сигнал имеет максимальную амплитуду вблизи первого канала и минимальную вблизи второго канала. Второй, обратный – наоборот.

Двухканальный режим измерений обеспечивает более высокую точность и детальность измерений, поскольку последующая совместная обработка двух сигналов компенсирует их затухание с удалением от измерителя вдоль кабеля. Максимум затухания комплексного сигнала располагается в середине линии, а не в ее конце. В случае повреждения одного из оптических волокон, измерения могут быть продолжены с меньшей точностью в одноканальном режиме до места разрыва. При нормальном функционировании системы Silixa Ultima способна обеспечить повторяемость измеренных значений температуры с погрешностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, чувствительностью к изменению температуры вдоль оптоволоконна $0,1^{\circ}\text{C}$ и пространственной разрешающей способностью не более 0,25 м при длине линии до 10 км.

2.4 Анализ изменений температурного поля в породном массиве по данным контрольно-термических скважин при активном и пассивном замораживании

Распределение температур по длине КТ скважины (термограмма) позволяет на качественном (визуальном) уровне оценить развитие процесса теплопереноса в массиве горных пород (рисунок 2.11). Вид температурных кривых зависит от геологического разреза. Различные слои горных пород обладают разными теплофизическими и влажностными характеристиками, следовательно, скорость распространения теплоты

(«холода») в них также различна. Данный факт обуславливает вертикальную неоднородность распределения температур.

Температурные кривые, представленные на рисунке 2.11, характеризующие процесс распространения «холода» в породном массиве, отчетливо отражают существенное различие в строении геологического разреза на участках строительства двух шахтных стволов Дарасинского рудника, ранее описанных в разделе 2.1.2 и на рисунке 2.2.

а)

б)

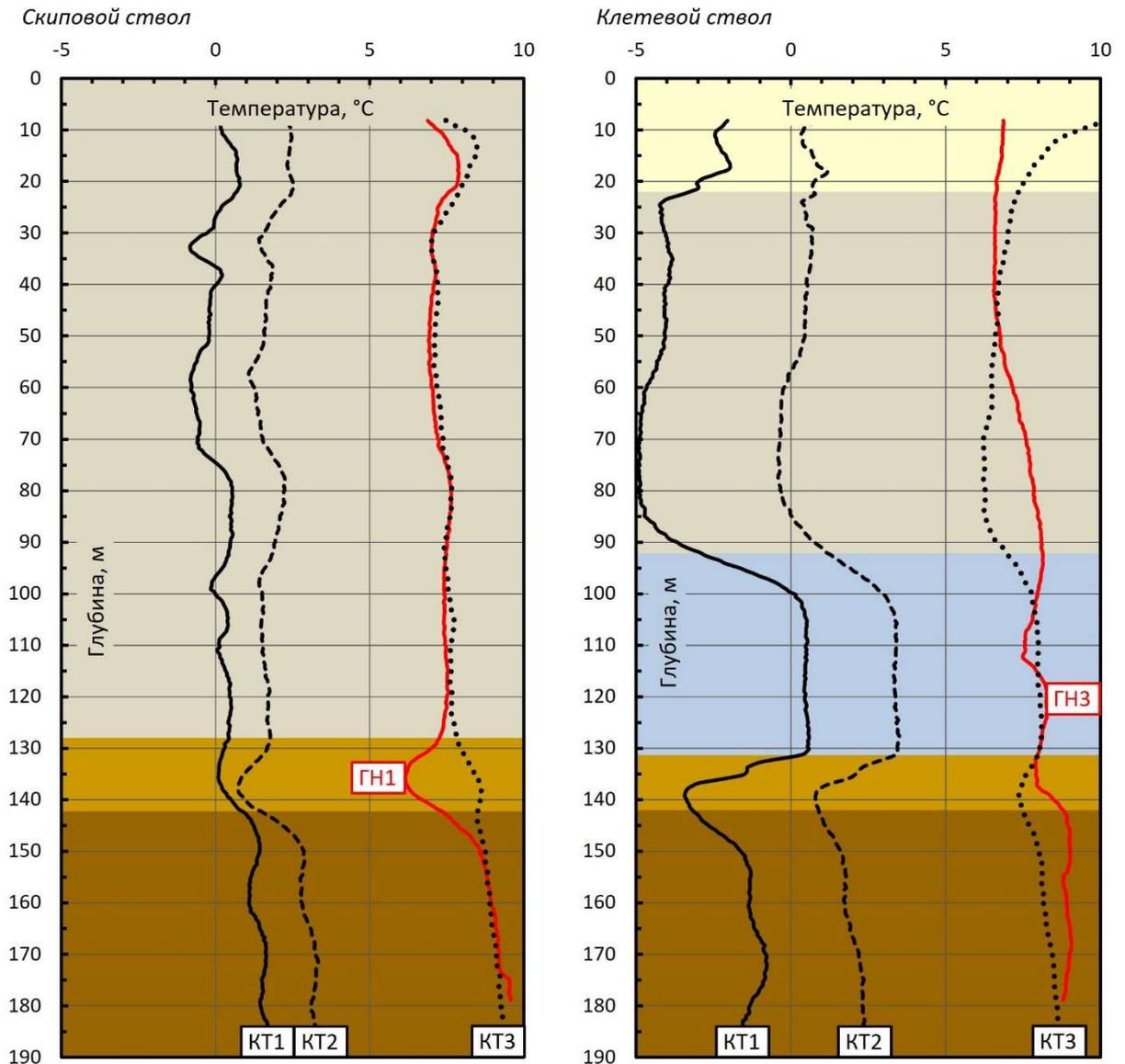


Рисунок 2.11 – Распределение температур в КТ и ГН скважинах по показаниям DTS системы на участках строительства скипового (слева) и клетового (справа) шахтных стволов в период формирования ЛПО. Заливкой показаны **основные геологические слои** разреза

Так в распределении температур в КТ скважинах скипового ствола отсутствует характерное замедление, отвечающее мощному слою мела писчего в условиях клетового

ствола. Толща отложений палеодолины отмечается более дифференцированным характером температурных кривых, что свидетельствует о неравномерном переслаивании пород с существенно различными теплофизическими свойствами. Породы, обладающие низкой теплопроводностью и высоким влагосодержанием, в целом замораживаются медленнее, чем обладающие высокой теплопроводностью и низким влагосодержанием. Влагосодержание играет значительную роль, поскольку фазовое превращение воды в лед отнимает более половины суммарной холодильной мощности, выдаваемой замораживающими колонками. Оставшаяся доля затрачивается на охлаждение породы до температуры кристаллизации воды в ее порах и на охлаждение водолеяной смеси в порах уже замороженной породы. С увеличением размеров ЛПО отбор теплоты замораживающими колонками из массива снижается. Уменьшается скорость понижения температуры массива вокруг каждой КТ скважины, что отражается в расстоянии между термограммами, зарегистрированными с периодичностью, например, в 1 месяц, как продемонстрировано на рисунке 2.12. Кривые сглаживаются, дифференциация слоев с различными теплофизическими свойствами снижается.

Рассмотрим изменение температуры в КТ скважинах на трех отметках, соответствующих серединам укрупненных литологических разностей – слоев геологического разреза на участке строительства клетового ствола Дарасинского рудника: (а) песок, супесь на отметке -53,0 м; (б) мел песчый на отметке -112,7 м и (в) глина плотная на отметке -160,4 м. На рисунке 2.13 графики температур для указанных отметок представлены в совокупности с графиком изменения температуры хладоносителя в замораживающих колонках, что позволяет соотнести изменения с различными этапами искусственного замораживания.

Первоначально предполагалось разделить технологический процесс искусственного замораживания на три этапа: (1) активное замораживание или формирование ЛПО; (2) пассивное замораживание или поддержание уже сформированного ЛПО и (3) размораживание ЛПО при подготовке к гидроизоляции ствола. Но в ходе работ была предложена и реализована новая концепция, подразумевающая поинтервальное ведение горных работ по факту достижения требуемых параметров ЛПО в заданных интервалах разреза. Это позволило оптимизировать строительство, но сгладило переход между этапами формирования и поддержания ЛПО. Управление режимом работы замораживающего комплекса производилось как переключением уставок холодильного оборудования, регулирующих температуры прямого потока хладоносителя в рассольной сети, так и полным (поочередным) выводом из работы блоков замораживающей станции, что

приводило к большей экономии энергозатрат. Подробно процесс управления работой замораживающего комплекса будет изложен в разделе 5.

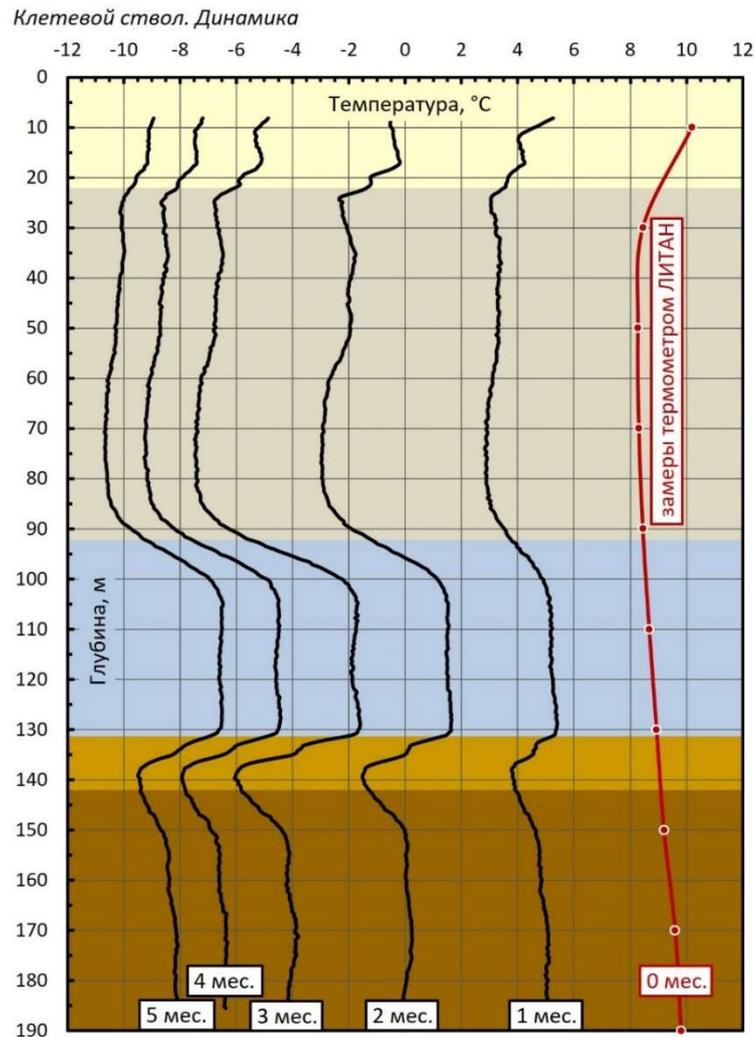


Рисунок 2.12 – Динамика температур с интервалом 1 месяц по показаниям DTS системы в скважине КТ1 на участке строительства клетового ствола Дарасинского рудника

Очевидно, что такие породы, как мел и глина, обладающие сниженными значениями коэффициента теплопроводности, повышенной теплоемкостью и влагосодержанием, медленнее реагируют на изменения температуры хладоносителя в замораживающих колонках, что отображается в более сглаженных кривых изменения температуры по сравнению с песчаными-супесчаными грунтами. В первых двух случаях более выражена тепловая инерционность породы.

Интересно, что динамика изменения температур в КТ скважинах (рисунок 2.13) определяется не только теплофизическими характеристиками породы, но и местоположением самой термометрической колонки, точнее, ее удалением от замораживающих колонок. Удаление скважины КТ1 от замораживающих колонок составляет 1,5 м, КТ2 – 2,25 м, КТ3 – 6,0 м.

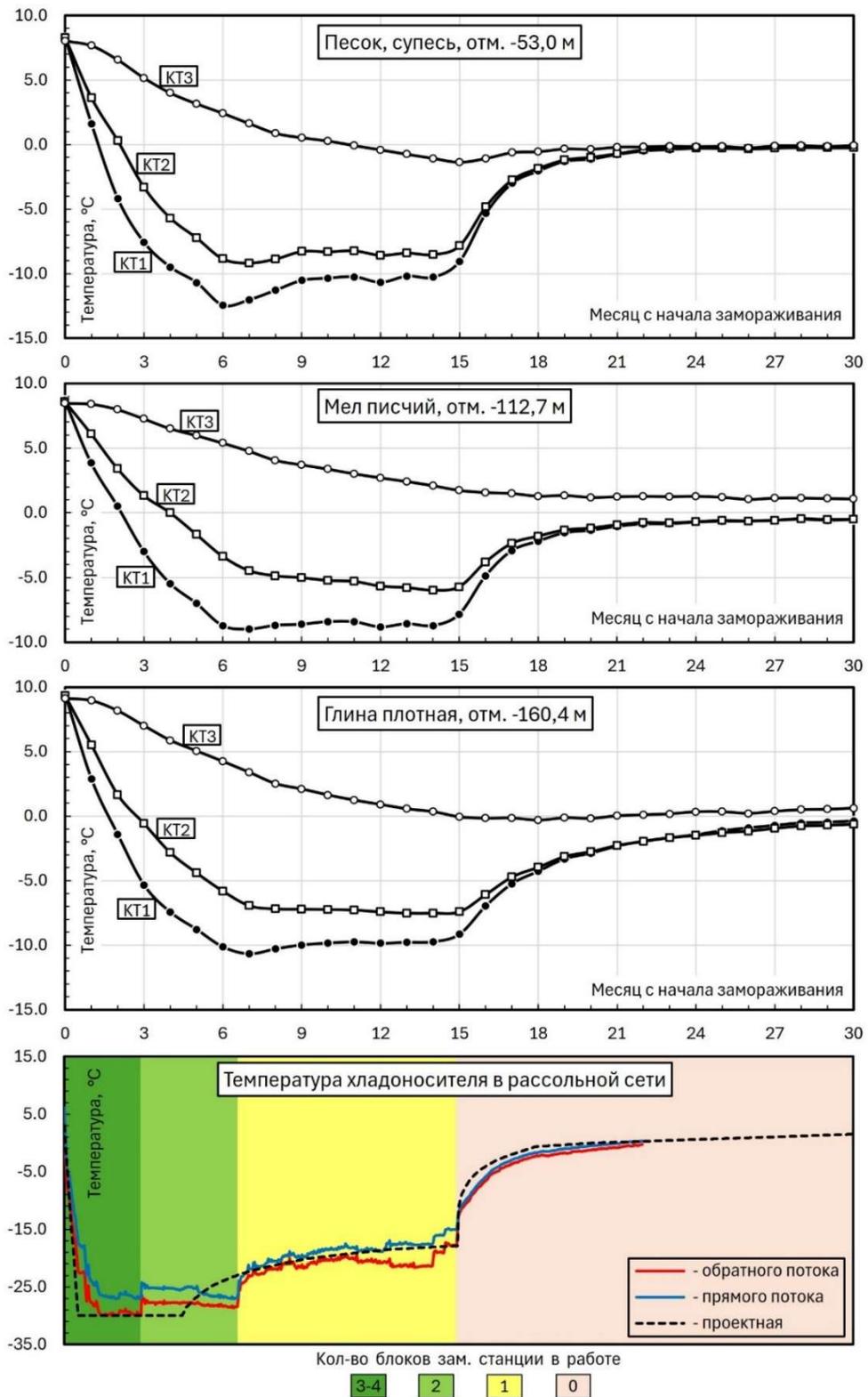


Рисунок 2.13 – Изменение температуры в КТ скважинах на заданных отметках в различных слоях горных пород в процессе формирования, поддержания и размораживания ЛПО для скипового ствола Дарасинского рудника

Ближайшая к замораживающим колонкам скважина КТ1 демонстрирует большую чувствительность к изменению режима работы замораживающего комплекса в целом, а, следовательно, необходимо оценивать его среднюю температуру и толщину по изотермам

с температурой прочной породы (в нашем случае -10°C), тогда как наиболее удаленная КТЗ позволяет надежно отслеживать продвижение внешней границы мерзлой породы по температуре начала ее замерзания в поровом пространстве.

При повышении температуры хладоносителя температуры в ближайшей к замораживающим колонкам скважине КТ1 через непродолжительное время также начинают повышаться, тогда как в скважине КТ2 повышение температуры происходит с некоторой задержкой, а в КТ3 температуры демонстрируют прежнюю однонаправленную динамику. Повышение температуры в скважине КТ1 уже сигнализирует о повышении средней температуры ЛПО. Визуально (на качественном уровне) оценить текущее состояние ЛПО в каждый момент времени его эксплуатации по разнонаправленной динамике температур в КТ скважинах крайне затруднительно. С этой целью применяется теплофизическое (численное математическое) моделирование, позволяющее в рамках принятых модельных представлений установить распределение температур во всем массиве горных пород, вмещающем будущую или пройденную горную выработку.

На распределение температур в каждой отдельно взятой КТ скважине на одном участке строительства ствола в разной степени оказывают влияние процессы, характеризующиеся анизотропией в пространстве. Например, направленное движение подземных вод через участок искусственного замораживания или продвижение тампонажного раствора через ослабленные участки ЛПО, что обуславливает дополнительные возможности извлечения информации об этих явлениях из детальных показаний оптоволоконной системы термометрического контроля и позволяет вовремя скорректировать технологические процессы.

Рассмотрим случай аномальной динамики температур, проявившейся в условиях строительства скипового ствола Дарасинского рудника. В слое песчаника в интервале глубин 133,7-141,5 м, выстилающем ложе палеодолины, в начальный период формирования ЛПО по показаниям оптоволоконной системы термометрического контроля была обнаружена температурная аномалия следующего вида (рисунок 2.14): температуры в скважинах ГН1.1 (другое обозначение скважины ГН1 скипового ствола), расположенной внутри контура проходки ствола, и КТ1.2, расположенной западнее с внешней стороны от контура замораживающих колонок (см. миникарту на рисунке 2.14), снижались быстрее, чем в выше- и ниже лежащих слоях. При этом в остальных КТ скважинах подобная динамика отсутствовала. Скважины ГН1.1 и КТ1.2 были удалены от контура замораживающих колонок на большее расстояние, чем КТ1.1.

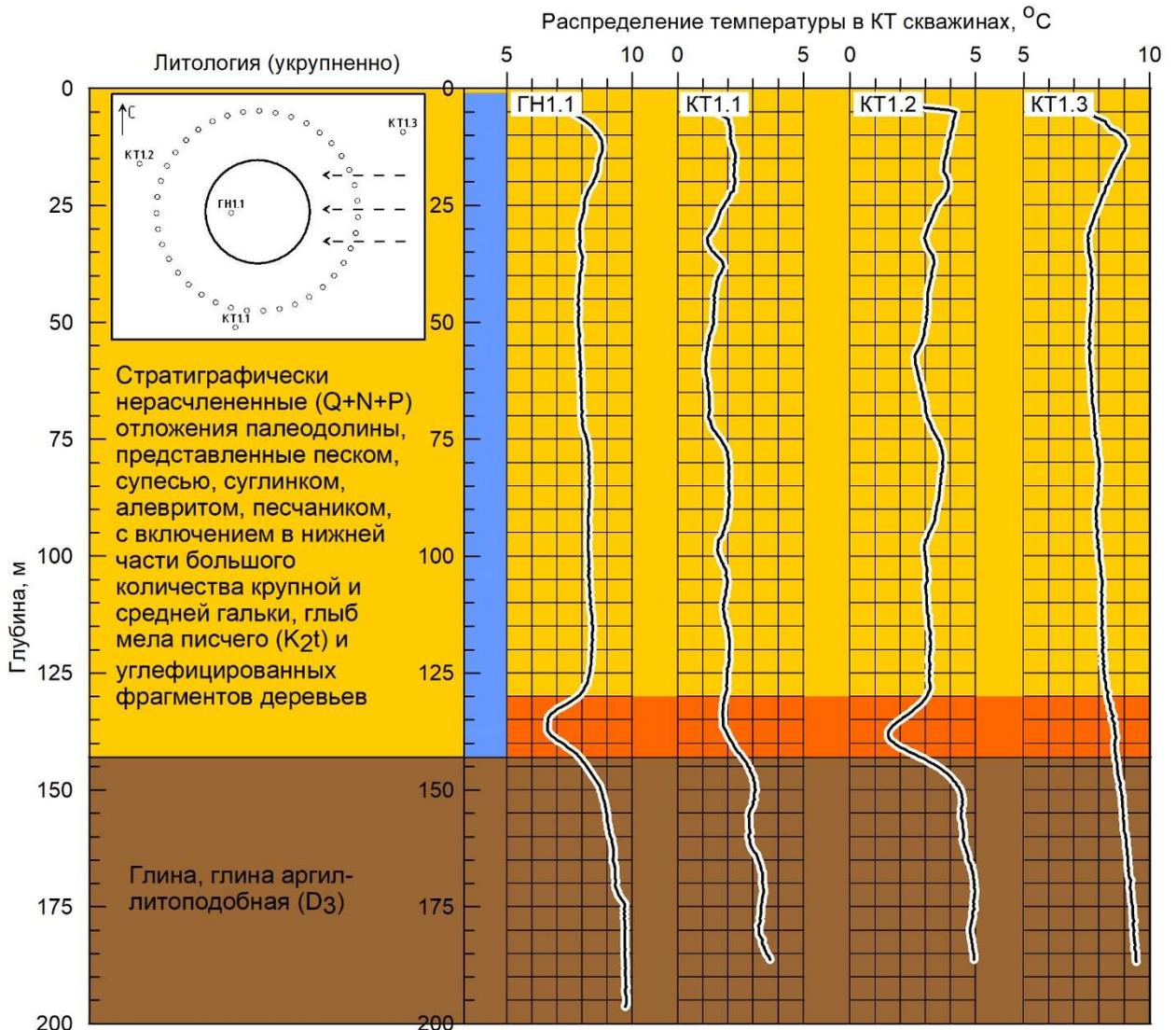


Рисунок 2.14 – Температуры в КТ скважинах скипового ствола Дарасинского рудника в период формирования ЛПО спустя 1,5 месяца с начала замораживания

Такая динамика температур противоречила нормальному процессу кондуктивного распространения теплоты и могла быть объяснена только наложением процесса массопереноса. Существовало две наиболее вероятных причины, объясняющие явление температурной аномалии: (1) утечка рассола из замораживающих колонок, ближайших к скважинам КТ1.2 и ГН1.1; (2) направленная фильтрация подземных вод в данном слое пород.

После проверки рассольной сети на герметичность гипотеза (1) не подтвердилась. В случае достоверности гипотезы (2) о направленной фильтрации подземных вод через участок строительства ствола, наиболее вероятным представлялось направление движения воды с востока на запад, что приводило к минимальным искажениям температур в скважине КТ1.1, расположенной в направлении на юг от центра ствола, то есть ортогонально направлению движения подземных вод через контур замораживающих колонок.

Данная гипотеза хорошо объясняла обнаруженную температурную аномалию. При движении со стороны скважины КТ1.3 относительно теплые подземные воды проходили через восточный сегмент контура замораживающих колонок, охлаждались и попадали на скважину ГН1.1, продуцируя температурное отклонение от выше- и нижележащих слоев горных пород более чем на 1°C. Следуя далее в направлении скважины КТ1.2 через западный сегмент контура замораживающих колонок охлажденные воды формировали аналогичную температурную аномалию. Подтверждением данной гипотезы должно было служить проявление аналогичной аномалии, но противоположного знака, спустя некоторое время в скважине КТ1.3 в указанном интервале глубин, обусловленное постоянным притоком теплых вод с востока, препятствующих распространению холода в данном направлении.

Анализ температурных кривых, полученных с помощью системы DTS через восемь месяцев после начала искусственного замораживания (рисунок 2.15), показал, что гипотеза подтвердилась.

На температурной кривой скважины КТ1.3 сформировалась характерная положительная аномалия с относительной амплитудой более 3°C, которая прежде не наблюдалась. В то время как аномалия в скважине КТ1.2 уменьшилась по амплитуде, что было вызвано смыканием ЛПО и прекращением фильтрации подземных вод через контур замораживающих колонок, так как в этом случае ее существование поддерживалось лишь за счет тепловой инерции при продолжающемся процессе кондуктивного теплопереноса. Измерения в скважине ГН1.1 к этому времени были недоступны вследствие ее ликвидации до начала проходки ствола. Позднее, в рамках теплофизического моделирования была установлена скорость фильтрации подземных вод (скорость Дарси), отвечающая результатам температурных измерений, которая составила всего 3 мм/сутки.

Следующий пример показывает влияние тепломассообмена от прорыва тампонажного раствора через ослабленный участок ЛПО на этапе его размораживания (рисунки 2.16-2.17). При выполнении тампонажных работ термометрические датчики подлежат демонтажу на отметках выполнения работ, и информация о состоянии ЛПО поступает только с КТ скважин, расположенных вне контура замораживающих колонок. При тампонаже закрепного пространства ЛПО используется в качестве экрана, не допускающего утечки тампонажного раствора в массив и, как следствие, его перерасхода.

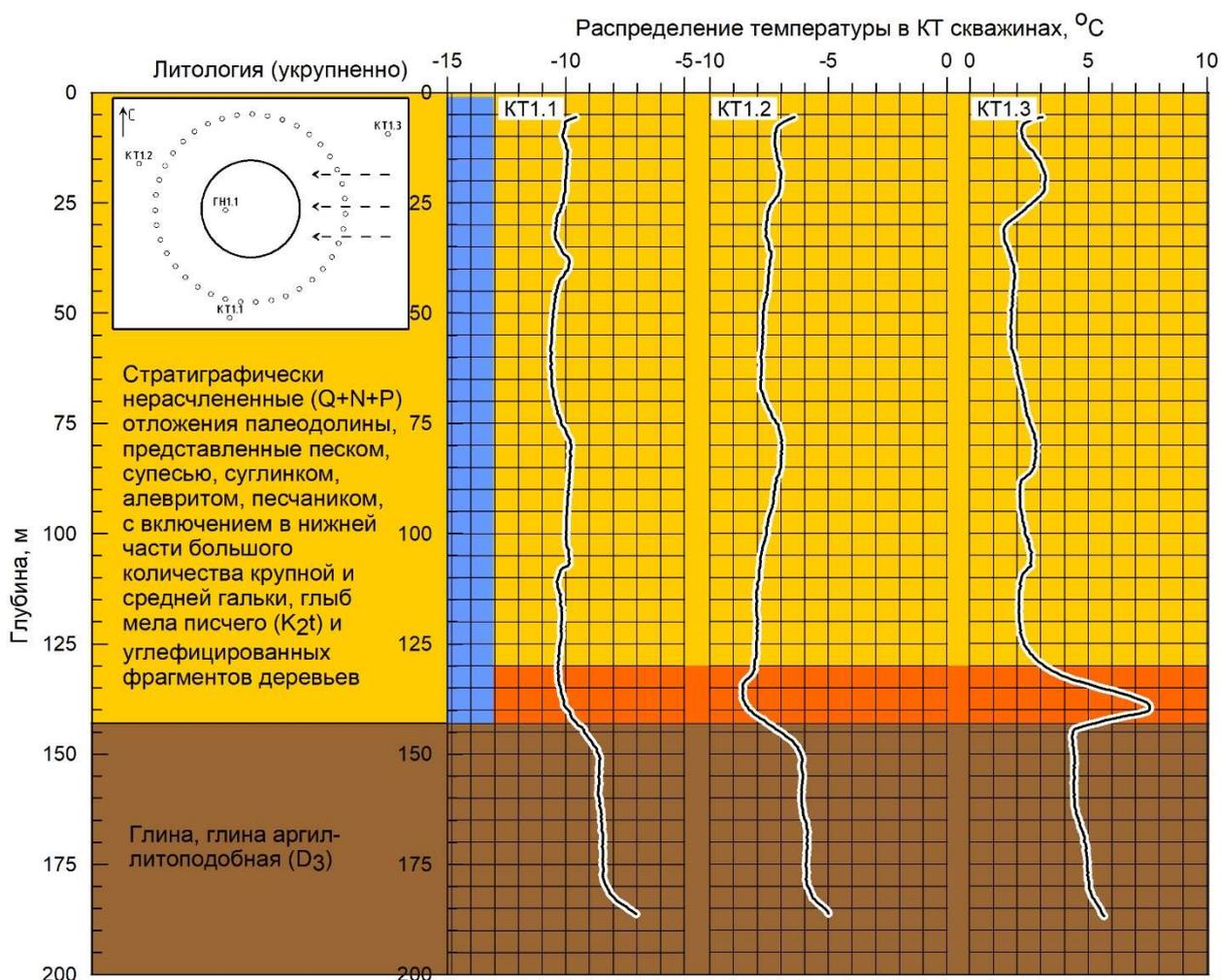


Рис. 2.15 – Температуры в КТ скважинах скипового ствола Дарасинского рудника в период поддержания ЛПО спустя 8 месяцев с начала замораживания

При проникновении раствора в массив и достижении им КТ скважины по ослабленному участку ЛПО в показаниях оптоволоконной системы термометрического контроля фиксируется кратковременное (от нескольких часов до нескольких суток) повышение температур в интервале тампонажа, поскольку температура инъецируемого тампонажного раствора выше температуры мерзлой породы. Величина теплового влияния определяется объемом закачанного тампонажного раствора. Такое изменение температур может являться сигналом о прекращении тампонажа в данном секторе тубинговой крепи во избежание перерасхода раствора и временном перемещении работ в другой сектор. Спустя некоторое время после схватывания раствора в порово-трещинном пространстве массива при необходимости может быть выполнен контрольный тампонаж данного сектора.

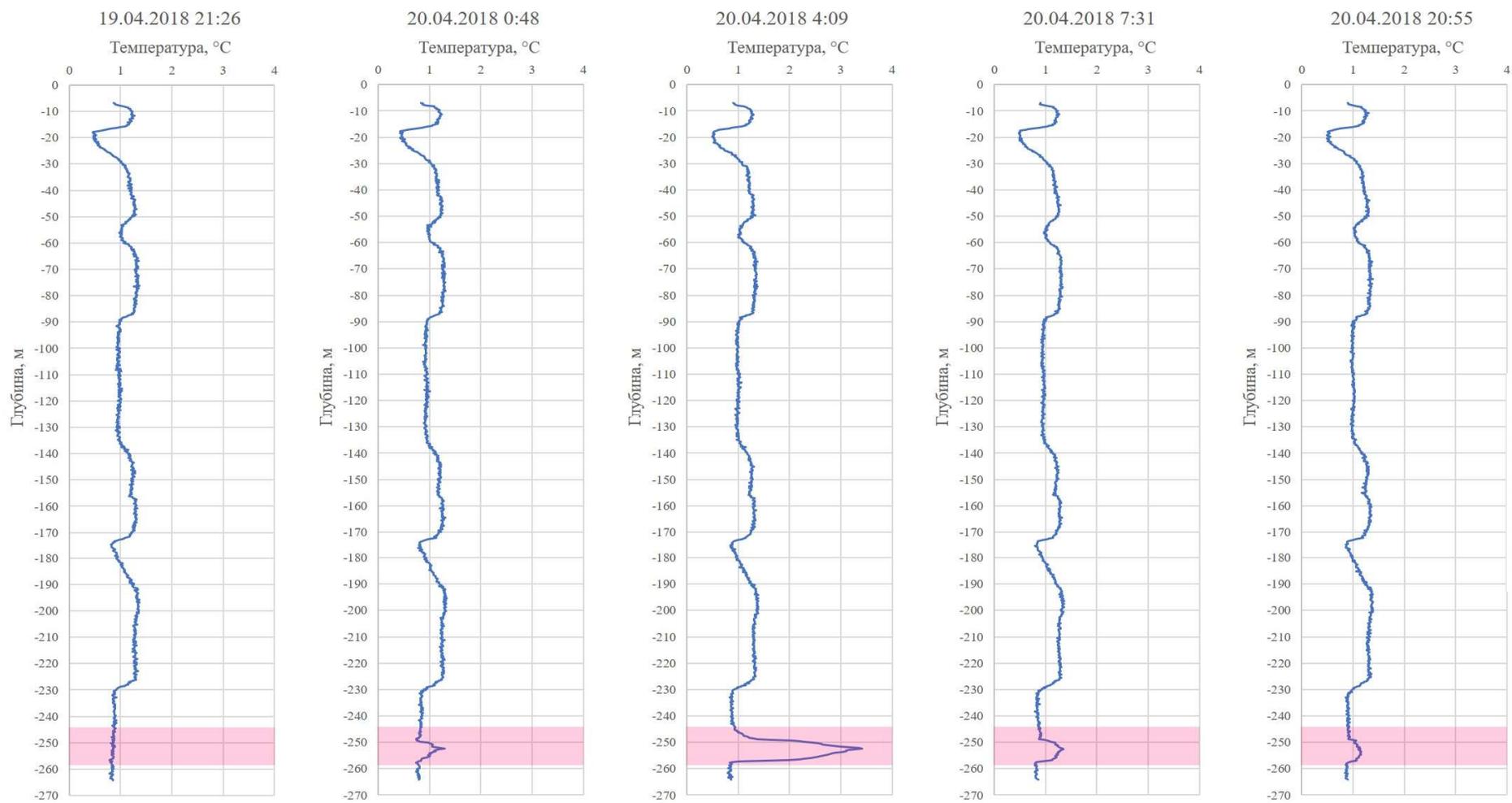


Рисунок 2.16 – Кратковременная реакция системы термометрического контроля в скважине КТ2 ствола №1 Петриковского ГОК на проникновение тампонажного раствора в массив через ослабленный участок ЛПО в интервале глубин 250-260 м

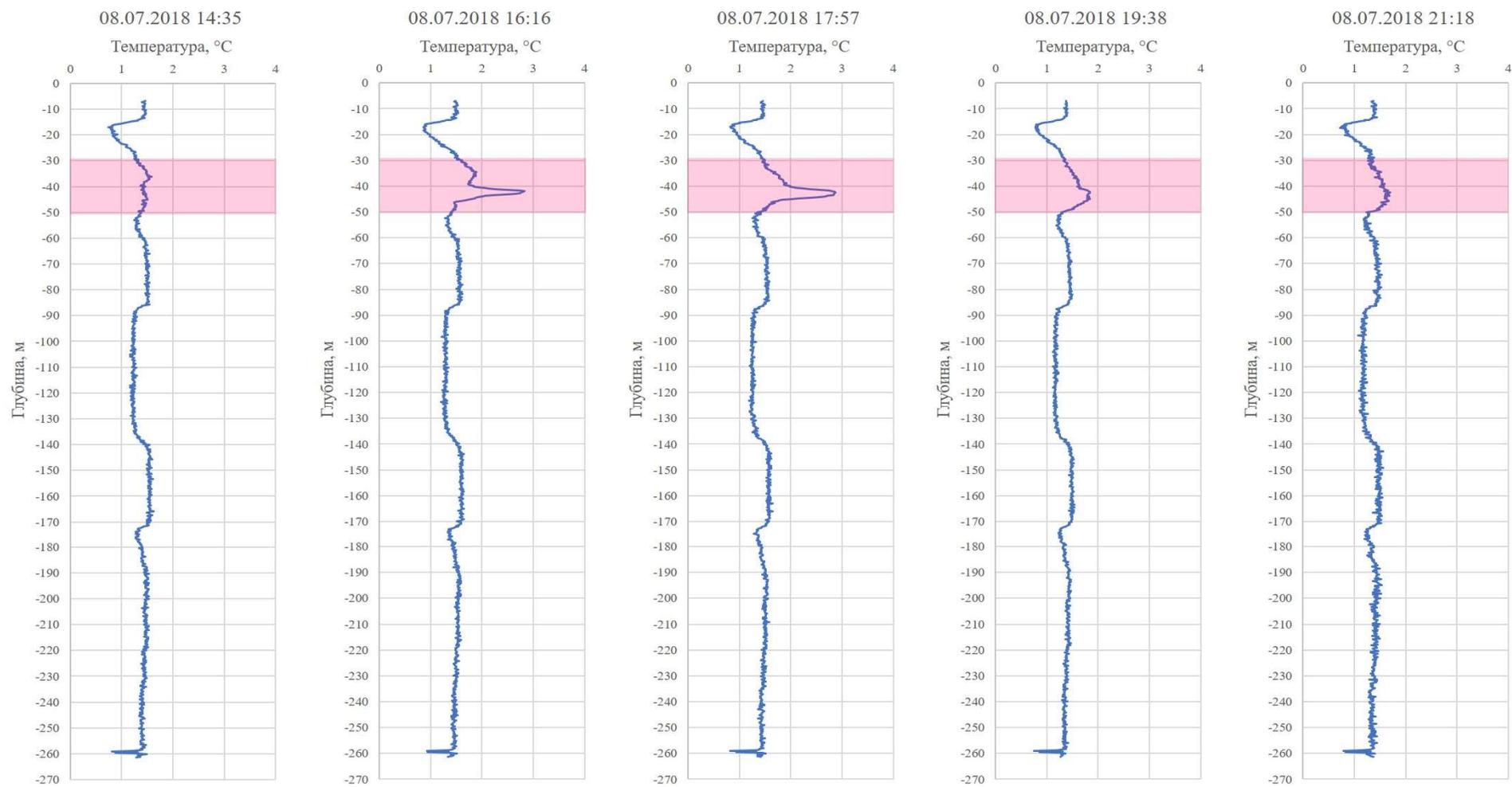
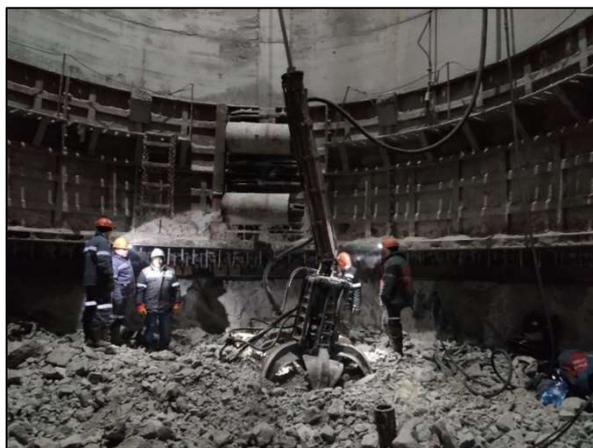


Рисунок 2.17 – Кратковременная реакция системы термометрического контроля в скважине КТ1 ствола №1 Петриковского ГОК на проникновение тампонажного раствора в массив через ослабленный участок ЛПО в интервале глубин 30-50 м

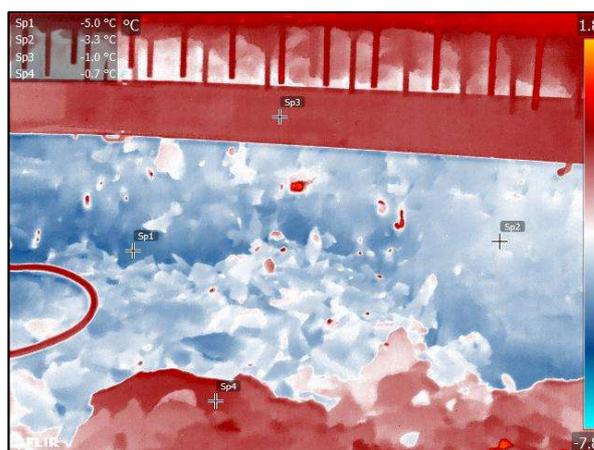
Гидронаблюдательные скважины в контуре проходки ствола подлежали ликвидации до ее начала и не могли быть использованы для дальнейшего измерения температур. Информация о распределении температур во внешних КТ скважинах по отношению к контуру замораживающих колонок не давала представления о процессах теплообмена, протекающих во внутренней области. Дополнительную информацию обеспечивали периодические замеры температуры поверхности незакрепленной стенки ствола в процессе проходки, выполняемые контактным способом (термометром), а также данные тепловизионной съемки.

Последние позволяли визуально оценить равномерность промерзания породы по контуру ствола (рисунок 2.18), величину теплового влияния работающего в стволе оборудования, а сопоставление измеренных температур с вычисленными в результате теплофизического моделирования – оценить достоверность модельных построений.

а)



б)



в)

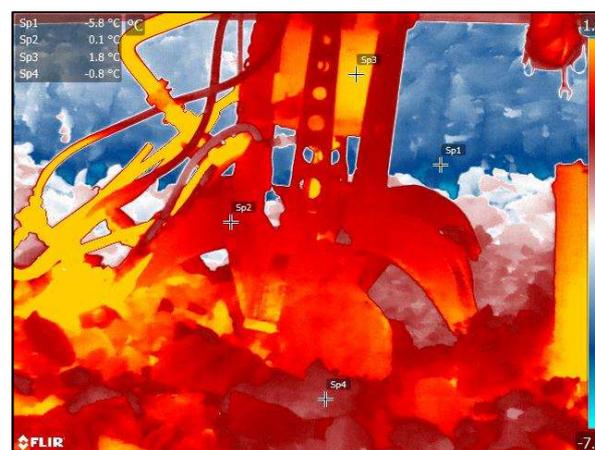


Рисунок 2.18 – Фотодокументация (а) и тепловизионные снимки породной стенки (б) и забоя (в) ствола, включая проходческое оборудование

2.5 Исследование особенностей размораживания пород с помощью расширенного функционала оптоволоконной системы термометрического контроля ЛПО

При подготовке к тампонажным работам, которые соотносятся с этапом размораживания ЛПО, возникает необходимость получения информации о температурах закрепного пространства. Традиционно температуры измеряют путем погружения термометра в термометрические шпуров глубиной 2-3 м, пробуренные через технологические отверстия в тубинговой крепи. Ручные замеры производятся периодически.

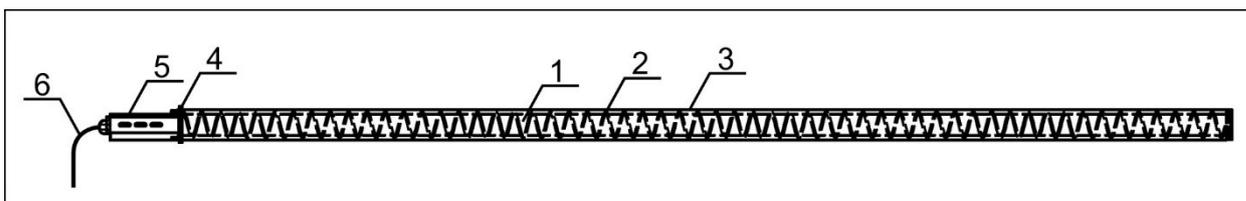


Рисунок 2.19 – Скважинный оптоволоконный датчик непрерывного контроля температуры. Конструктивные элементы: 1 – направляющая (внутренняя стальная труба); 2 – измерительный оптоволоконный кабель без оплетки, намотанный с заданным углом повива на направляющую; 3 – защитная гильза (внешняя стальная труба); 4 – крепежная стальная пластина; 5 – распаечная коробка; 6 - магистральный (соединительный) оптоволоконный кабель в оплетке

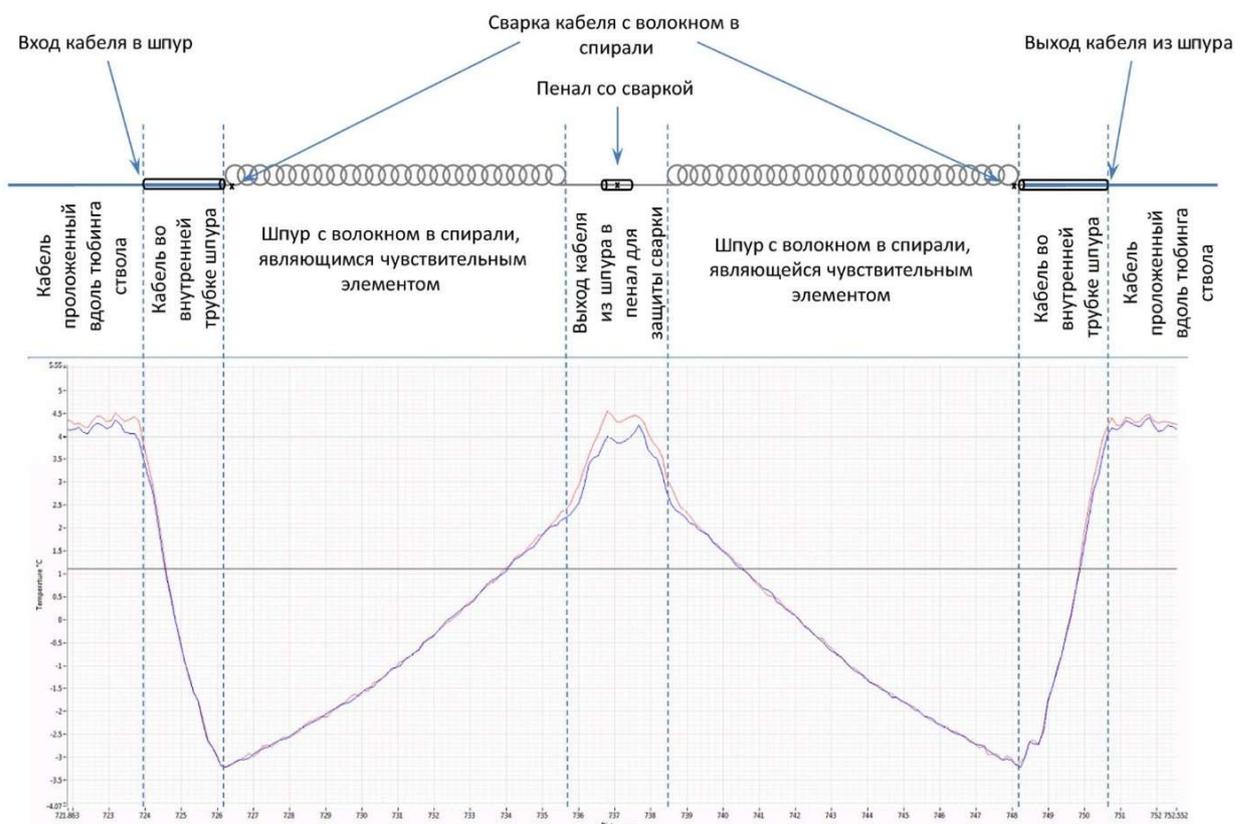


Рисунок 2.20 – Схема внутреннего устройства термометрического датчика в развертке, совмещенная с распределением температур по его длине, зафиксированным DTS регистратором Silixa Ultima в режиме двухканальных измерений

С целью автоматизации данной процедуры при непосредственном участии автора разработаны оптоволоконные термометрические датчики непрерывного контроля температуры [46]. Конструкция датчика представлена на рисунках 2.19-2.20, а его внешний вид – на рисунке 2.21 [102].



Рисунок 2.21 – «Гирлянда» скважинных оптоволоконных датчиков, подготовленная к установке (а) и датчик, установленный в крепи ствола (б)

Путем последовательного соединения при помощи магистрального оптоволоконного кабеля датчики объединены в линию, для калибровки которой достаточно произвести замеры температуры термометром в двух ее точках, в верхней и нижней частях линии, например, в первом и последнем шпурах по порядку следования. Это является несомненным преимуществом перед совокупностью независимых датчиков, например, термометров сопротивления, характеристики каждого из которых изменяются во времени независимо.

Линия датчиков подключалась к свободным каналам DTS регистратора. Обеспечивалась повторяемость измеренных значений температуры в $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ и чувствительность к ее изменению в $0,1^{\circ}\text{C}$, а за счет повива измерительного волокна вдоль направляющей пространственная разрешающая способность увеличилась до 0,03-0,1 м. Показания оптоволоконных датчиков обеспечивают недостающую информацию для теплофизического моделирования процессов теплопереноса в системе «ствол –

крепь – массив – замораживающие колонки» и позволяют исследовать распространение теплоты по ориентации шпура. На рисунке 2.22 представлены распределения температур вдоль термометрических датчиков, установленных на различных отметках в передовом бетоне (отметки 35, 55, 75 и 100 м) и переустановленные в тубинговую крепь (отметки 150, 173 и 240 м) в процессе монтажа тубинговой колонны в направлении снизу-вверх. Пример приведен для условий клетового ствола Петриковского ГОК.

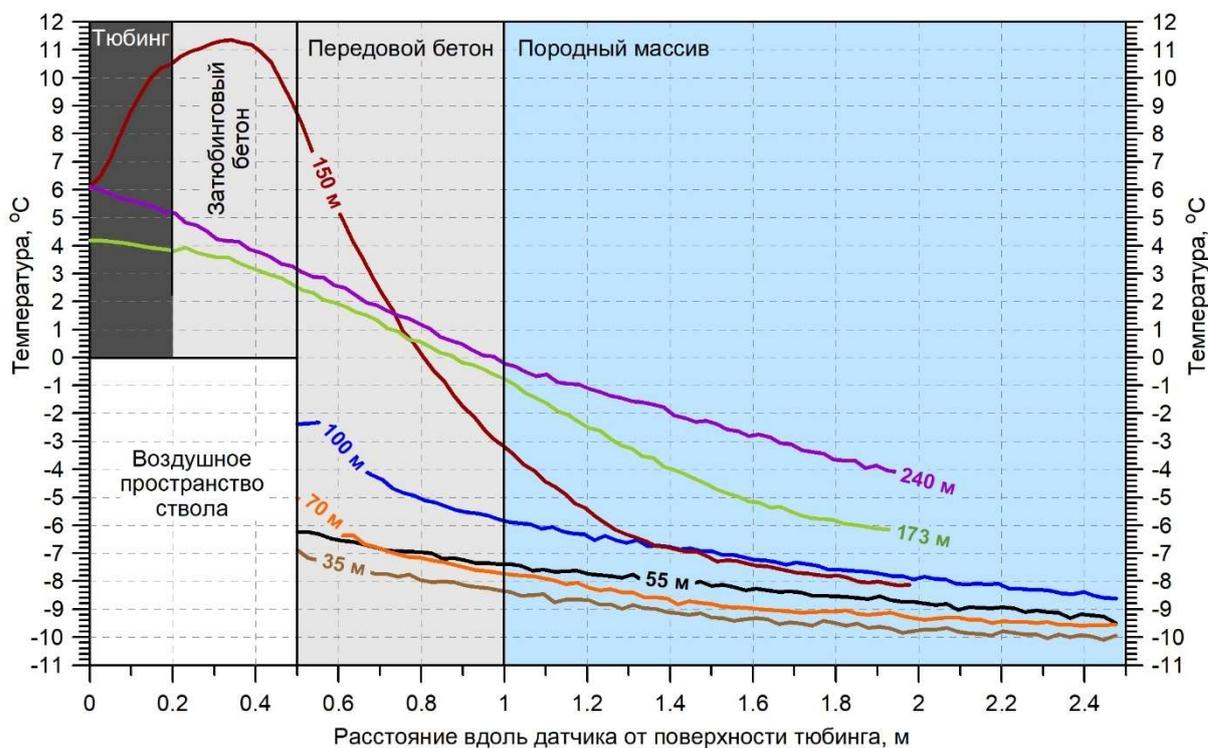


Рисунок 2.22 – Распределение температур вдоль термометрического шпура для датчиков, установленных на различных отметках в передовом бетоне и крепи

В показаниях термометрического датчика на отметке 150 м, зафиксированных спустя сутки после монтажа тубинговой крепи, отчетливо проявляется тепловое влияние экзотермической реакции твердения затюбингового бетона. В показаниях датчиков на отметках 173 м и 240 м данное температурное влияние уже нивелировано со временем. Выделенная теплота в процессе кондуктивного теплопереноса рассеялась в примыкающий замороженный массив, внося определенный вклад в повышение его температур, а также частично была удалена с шахтным воздухом при проветривании ствола путем теплопередачи через тубинговую крепь, обладающую высокой теплопроводностью.

Более отчетливо тепловое влияние экзотермической реакции твердения затюбингового бетона можно наблюдать, исследуя динамику температур, измеренную одним и тем же датчиком на отметке 150 м в различные моменты времени после отключения замораживающей станции (рисунок 2.23).

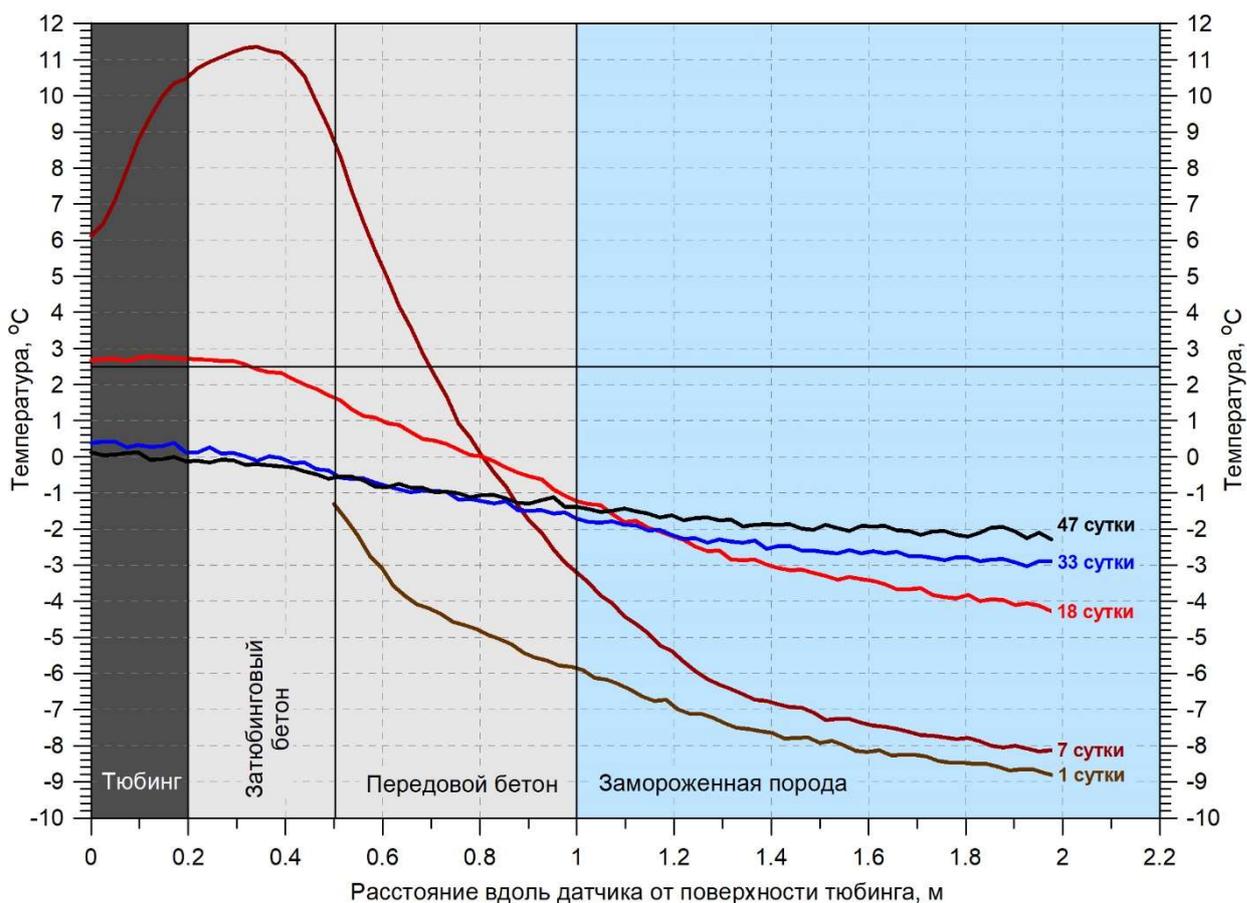


Рисунок 2.23 – Динамика температур в термометрическом шпуре на глубине 150 м (песчаник) после отключения замораживающей станции

Переустановка датчика в тубинговую крепь была выполнена на 6 сутки после отключения замораживающей станции, а через 27 дней (см. график на 33 сутки) практически вся теплота, выделившаяся при твердении бетона, была удалена из него, а температуры крепи в среднем приблизились к 0°C . При этом, несмотря на отключенную замораживающую станцию, не произошло размораживания породы, примыкающей к передовому бетону. Эффект выразался только в повышении ее температур, что свидетельствует о том, что в данных условиях выделенного при гидратации раствора количества теплоты недостаточно для совершения фазового перехода льда в породе в жидкое состояние.

2.6 Выводы по главе

1. Выделены типовые литологические разности, характерные для Старобинского и Петриковского месторождений в интервале замораживания горных пород, для которых впервые проведен наиболее полный комплекс лабораторных испытаний с определением физических и теплофизических параметров,

условно-мгновенных и предельно длительных значений механических характеристик, изучены реологические свойства в мерзлом состоянии.

2. Анализ результатов лабораторных испытаний позволил выявить существенное влияние температуры мерзлой породы на ее механические свойства, при этом – практически линейный характер повышения механических характеристик с понижением температуры; установлено, что предельно-длительные значения предела прочности на одноосное сжатие и структурного сцепления в медианном выражении в 1,57 и 1,85 раз меньше их условно-мгновенных аналогов соответственно.
3. Предложен комплекс измерений температуры горных пород в естественном залегании, основанный на использовании оптоволоконных технологий, дополненных контактными измерениями температуры и тепловизионной съемкой внутри строящегося шахтного ствола при его проходке, позволяющий получать актуальную информацию для контроля состояния ЛПО в процессе его эксплуатации.
4. Анализ показаний оптоволоконной системы термометрического контроля ЛПО за различные периоды времени выявил существенные вариации в динамике температуры в разных КТ скважинах в зависимости от теплофизических и влажностных свойств окружающих горных пород, этапа процесса замораживания, удаленности термометрических колонок от замораживающих, изменения режима работы замораживающего комплекса, что предопределяет необходимость математического моделирования с учетом влияния всех факторов для наиболее корректной оценки температурного состояния породного массива.
5. В процессе экспериментальных измерений подтверждена высокая чувствительность системы термометрического контроля к выявлению температурных аномалий, вызванных направленным движением флюидов (подземных вод, тампонажного раствора) через замораживаемое пространство; анализ информации о данных процессах, накладывающихся на кондуктивный теплоперенос, позволил определить как направление движения флюида, так и скорость.
6. Изложена конструкция разработанного на основе DTS технологии температурного датчика нового типа, позволяющего автоматизировать процесс измерения температур закрепного пространства посредством их установки в

термометрические шпурь в крепи ствола на этапе размораживания ЛПО при подготовке к выполнению тампонажных работ.

7. По результатам непрерывных наблюдений за температурами в термометрических шпурах установлено, что теплоты, выделяющейся при экзотермической реакции твердения затюбингового бетона, недостаточно для размораживания примыкающей к ней породы.
8. Совокупность экспериментальных данных, получаемых на различных этапах искусственного замораживания, позволяет параметризовать теплофизическую модель, постоянно актуализировать ее и поддерживать в рабочем состоянии в течение всего периода эксплуатации ЛПО.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В настоящее время для контроля формирования и состояния ЛПО, в том числе оценки его несущей способности в различные моменты времени, используется математическое моделирование процесса замораживания пород. Данный инструмент позволяет определить распределение и изменение во времени температуры во всем объеме замораживаемых пород. Полученная в ходе моделирования информация позволяет рассчитать толщину ЛПО и среднюю температуры замораживаемых пород, которые в дальнейшем используется для общей оценки состояния ЛПО и его несущей способности.

При этом результаты математического моделирования должны соотноситься с экспериментальными замерами температуры пород в КТ скважинах. В связи с этим часто возникает необходимость решения обратной задачи, когда требуется калибровка параметров модели для получения соответствия между модельными и экспериментальными температурами. В качестве калибруемых параметров обычно выбираются теплофизические свойства пород в мерзлом и талом состояниях, определенных в ходе лабораторных замеров. Такой выбор связан с тем, что данные параметры обычно являются наименее точными из-за недостаточного объема образцов керна по причине малого количества разведочных скважин.

Таким образом, разработка математической модели замораживающих пород и метода решения обратной задачи является необходимым для определения протекания теплофизических процессов в замораживаемых породах, уточнения теплофизических свойств пород и интерпретации данных с КТ скважин.

3.1 Содержательная постановка задачи тепломассопереноса при формировании ледопородного ограждения

Рассматривается задача о замораживании многослойного обводненного массива вокруг проектируемого шахтного ствола калийного рудника. Каждый слой имеет произвольные теплофизические, гидравлические и механические свойства. Распределение данных свойств так же произвольно (может быть однородным или неоднородным). В массиве вокруг проектируемого ствола установлен ряд замораживающих скважин с колоннами, по которым движется хладоноситель (рис. 3.1б). Это соответствует рассольной схеме замораживания. Скважины ориентированы вертикально, однако имеются небольшие отклонения от вертикали, что обусловлено

погрешностью определения вертикального направления при бурении. Множество скважин образует круговой контур замораживания, центр которого совпадает с центром проектируемого шахтного ствола.

В конце стадии активного замораживания, когда образуется замкнутое ЛПО с толщиной равной проектному значению, начинается проходка шахтного ствола с дневной поверхности. Ствол представляет из себя цилиндрическую полость с круговым поперечным сечением. Проходка ствола вглубь массива осуществляется в вертикальном направлении. При этом скорость проходки зависит от того, как быстро промораживаются определенные слои породного массива.

Принимается, что в качестве постоянной крепи ствола выступает бетонная крепь. В связи с этим при возведении крепи происходит тепловыделение вследствие твердения бетона. В дальнейшем также возникает теплообмен крепи с движущимся по стволу воздухом.

После достижения проектной толщины ЛПО во всем интервале замораживающих пород замораживающие колонки переходят в режим пассивного замораживания. Данный режим направлен на поддержание рабочего состояния ЛПО в течение всего периода проходки ствола, возведению постоянной бетонной крепи и/или гидроизоляции ствола. Режим характеризуется снижением холодопроизводительности замораживающих колонок путем повышения температуры и/или снижением расхода циркулирующего хладоносителя.

После окончания работ по возведению бетонной крепи, тубинговой крепи и/или гидроизоляции ствола ЛПО переводят в режим активного (искусственного) или пассивного (естественного) размораживания.

Исходя из вышеописанного принимается следующее:

- перенос тепла в объеме замораживаемых пород происходит за счет теплопроводности и конвекции, связанной с наличием фильтрации подземных вод;
- помимо переноса тепла существенное влияние на распределение термодинамических и гидравлических параметров в объеме замораживаемых пород оказывает наличие фазового перехода поровых вод из жидкого в твердое состояние и обратно;
- температура на границе между замораживающими колонками и породным массивом имеет нестационарный характер и зависит от температуры и расхода хладоносителя, циркулирующего в колонках;

- температура на границе строящегося ствола и породного массива зависит от тепловыделения вследствие твердения бетонной крепи шахтного ствола и теплообмена между бетонной крепью и воздухом, движущимся в стволе;

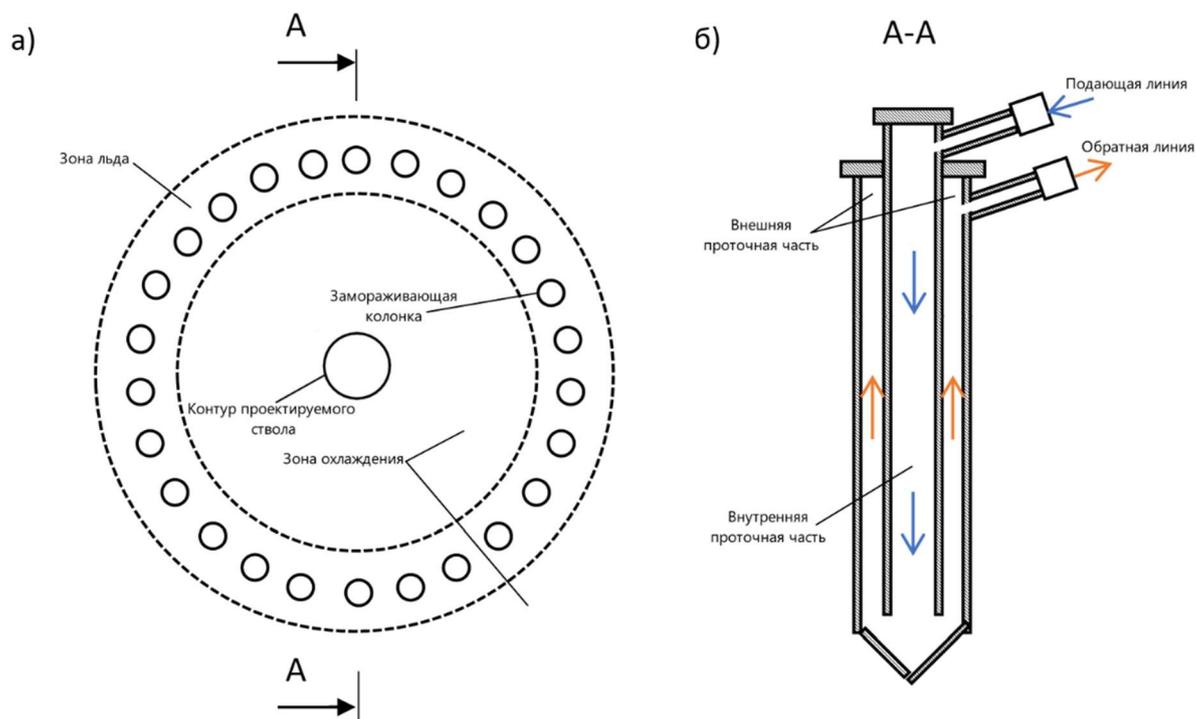


Рисунок 3.1 – Модельная геометрия породного массива (а) и рассольная схема замораживания (б)

Геометрически породный массив, замораживающие колонки и шахтный ствол рассматривались в виде цилиндров с круговым поперечным сечением (рис. 3.1а). При этом из-за протяженности слоев пород (от 10 м и больше) предполагалось, что тепловой поток в вертикальном направлении оказывает пренебрежимо малое влияние на температурное поле в срединном сечении каждого слоя. В виду этого моделирование каждого слоя рассматривалось только вдоль своего срединного сечения и независимо от других слоев.

3.2 Математическая постановка задачи

С учетом принятых допущений, описанных в разделе 3.1, теплоперенос в срединном сечении каждого слоя пород до начала проходки ствола можно описать в рамках следующей математической модели:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (3.1)$$

$$\lambda = \lambda_{un}(1-i) + \lambda_{fr}i, \quad (3.2)$$

$$H(T) = \begin{cases} \rho c_{un} (T - T_{lq}) + \rho_w w L, & T_{lq} \leq T \\ \rho_w w L \cdot (1 - i), & T_{sd} \leq T < T_{lq}, \\ \rho c_{fr} (T - T_{sd}), & T < T_{sd} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$i(T) = \begin{cases} 1, & T < T_{sd} \\ (T_{lq} - T) / (T_{lq} - T_{sd}), & T_{sd} \leq T < T_{lq}, \\ 0, & T_{lq} \leq T \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{N}} - \alpha_{fb} (T_{fb}(t) - T) \right]_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (3.5)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0, \quad (3.6)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.7)$$

$$T|_{CW_j} = T_j(t, z), \quad j = 1, \dots, N_{CW}, \quad (3.8)$$

где H — удельная энтальпия обводненного породного массива, Дж/м³; ∇ — оператор Набла; t — физическое время, с; \mathbf{V} — вектор скорости течения поровой воды, м/с; $\lambda_{un}, \lambda_{fr}$ — теплопроводности массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Вт/(м·°С); c_{un}, c_{fr} — удельные теплоемкости массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Дж/(кг·°С); ρ — плотность массива, кг/м³; T_{lq} — температура начала кристаллизации поровой воды, °С; T_{sd} — температура начала плавления порового льда, °С; i — объемная льдистость породного массива, м³/м³; L — удельная теплота кристаллизации воды, Дж/кг; w — начальная влажность пород, кг/кг; ρ_w — плотность поровой воды, кг/м³; $T_{fb}(t)$ — температура рассола в замораживающих колонках, °С; T_0 — температура непо потревоженного породного массива на удалении от контура замораживания, °С; α_{fb} — коэффициент теплоотдачи на границе с замораживающими скважинами, Вт/(м²·°С); $\Omega_{fb} = \cup \Omega_{fbi}$ — границы со всеми замораживающими скважинами $i = 1, \dots, N_{FC}$; Ω_{out} — внешняя граница области моделирования; \mathbf{N} — координата вдоль нормали к границе Ω_{fb} , м; $T_j(t, z)$ — измеренная температура на КТ скважине CW_j , °С.

Следует отметить, что под указанным ранее термином *зона охлаждения* подразумевается часть массива, в котором температура не достигла температуры полной

кристаллизации, при которой вся влага находится в твердом состоянии. Под термином *зона льда* соответственно подразумевается противоположное – это часть массива, в котором влага находится практически полностью в твердом состоянии.

В представленной модели (3.1)–(3.8) условие (3.8) является переопределяющим. Это означает, что модельные температуры в месте нахождения КТ скважин должны быть равны экспериментально измеренным. Это дополнительное условие приводит к переходу от решения прямой задачи к обратной. Обратные задачи считаются некорректными, поэтому решение уравнений (3.1)–(3.8) может быть получено методом регуляризации Тихонова [67]. В этом случае жесткое условие (3.8) заменяется функционалом вида:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N_{CW}} \frac{1}{\Delta T^2} \sum_{j=1}^{N_{CW}} (T_j^{(m)} - T_j^{(c)})^2}, \quad (3.9)$$

где I — функционал; $T_j^{(m)}$, $T_j^{(c)}$ — измеренная и модельная температуры в месте расположения КТ скважин, °С; ΔT — характерная разница температур в рассматриваемой задаче, °С. В качестве ΔT взята разница начальной температуры массива и температуры хладоносителя в замораживающих колонках.

Таким образом, обратная задача сводится к минимизации функционала (3.9). Минимизация осуществлялась путем подбора теплофизических свойств породного массива (теплопроводностей в зонах охлаждения и льда, начального влагосодержания), которые в данном случае являлись параметрами оптимизации. Для обеспечения единственности решения обратной задачи (3.1)–(3.9) также накладывалось дополнительное условие о том, что оптимизируемые теплофизические свойства породного массива должны иметь в среднем минимальное отклонение от своих начальных значений (не более 15 %).

Учет фазовых превращений поровой воды в модели осуществляется посредством задания функции удельной энтальпии $H(T)$ (3.3). Скачок этой функции в окрестности температур фазового перехода определяется величиной скрытой теплоты фазового перехода в единице объема обводненного породного массива. Предполагается, что скачок достаточно мал по сравнению с характерной разницей температур $T_0 - T_{fb}$ в задаче. Именно это позволяет рассматривать линейные зависимости (3.2) и (3.4). В действительности же фазовый переход поровой влаги для многих слоев пород может протекать в достаточно широком температурном интервале, что обычно связано с влиянием связанных вод [88, 95] и минерализацией поровой воды [38, 103].

Обычно в задачах промерзания и оттаивания пород расчет эффективной теплопроводности проводится с использованием среднего геометрического [73, 90, 109, 127]. Однако в модели (3.1)–(3.9) эффективная теплопроводность рассматривается на основе среднего алгебраического значения – это целесообразно в том случае, когда интервал температур $[T_{sd}; T_{lq}]$, в котором происходит фазовый переход большей части воды в порах, считается малым или начальное влагосодержание породы мало. Эти условия обычно выполняются в случае применения искусственного замораживания при проходке шахтных стволов. Использование алгебраического закона в этом случае более предпочтительно, поскольку позволяет сократить время вычислений.

В случае отсутствия выраженного течения поровой воды, вектор скорости течения \mathbf{V} в уравнении (3.1) можно приравнять нулю. Однако, если скорость течения поровых вод значительна, то \mathbf{V} нельзя приравнять нулю и в этом случае модель (3.1)–(3.9) должно дополняться уравнения баланса массы и Дарси:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{V} = -\frac{k_r K}{\mu} \nabla p, \quad (3.11)$$

с соответствующими граничными условиями

$$\mathbf{V}|_{\Omega_{out}} = \mathbf{V}_0, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{V}|_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (3.13)$$

где \mathbf{V}_0 — вектор скорости течения поровых вод в нетронутых (естественных) условиях, м/с; k_r — относительная проницаемость воды; K — абсолютная проницаемость породы, м²; μ — динамическая вязкость воды, Па·с; p — гидростатическое давление в поровом пространстве, Па.

Следует отметить, что уравнения (3.10)–(3.13) записаны в условии допущения о стационарности векторного поля скорости течения поровых вод.

Относительную проницаемость k_r , обычно принимают равной единице при $i = 0$ и равной нулю при $i = 1$. В связи с отсутствием эмпирических данных об относительной проницаемости воды в породах при различных отрицательных температурах в простейшем случае полагается, что

$$k_r = (1-i)^3, \quad (3.14)$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи на границе с замораживающими скважинами α_{fb} рассчитывается по следующей формуле [58-59]:

$$\alpha_{fb} = \frac{15\lambda_b}{d} \left(\frac{3600V_b d}{a_b} \right)^{0.23} \left(\frac{L}{d} \right)^{-0.5}, \quad (3.15)$$

где λ_b — теплопроводность рассола, Вт/(м·°С); d — диаметр замораживающей колонки, м; V_b — средняя скорость течения рассола по длине замораживающей колонки, м/с; a_b — температуропроводность рассола, м²/с; L — длина замораживающей колонки, м.

Уравнение (3.15) применимо только для ламинарного режима течения (при числах Рейнольдса $Re < 2100$). Так как на исследуемых объектах максимальный объемный расход рассола в замораживающей колонке составлял 6,67 м³/ч, а площадь поперечного сечения проточного канала равнялась примерно 50 см² (для восходящего потока коаксиальной трубы на рис. 3.1б), то число Рейнольдса составляло около 1400, что указывает на преобладание ламинарного режима течения в замораживающей колонке.

В момент времени, когда начинается проходка шахтного ствола модель (3.1)–(3.9) в модели появляется дополнительная подвижная во времени граница Ω_s между породным массивом и стволом. При этом модель дополняется следующим граничным условием:

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{N}} - \alpha_s (T_s(t) - T) \right]_{\Omega_s} = 0, \quad (3.16)$$

где $T_s(t)$ — температура воздуха в стволе, °С; α_s — суммарный коэффициент теплоотдачи между воздухом и породным массивом, Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплоотдачи между воздухом и породным массивом α_s рассчитывается по следующей формуле:

$$\alpha_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{air}} + \frac{d_l}{\lambda_l}}, \quad (3.17)$$

где α_{air} — коэффициент теплоотдачи в температурном пограничном слое воздуха, движущегося по стволу, Вт/(м²·°С); d_l — толщина крепи, м; λ_l — теплопроводность крепи, Вт/(м·°С).

Расчет α_{air} в формуле (3.17) производится по формуле А.Н. Щербаня [63]:

$$\alpha_{air} = 3,4 \frac{V_{air}^{0,8}}{d_s^{0,2}}, \quad (3.18)$$

где V_{air} — средняя скорость воздуха в стволе, м/с; d_s — диаметр ствола, м.

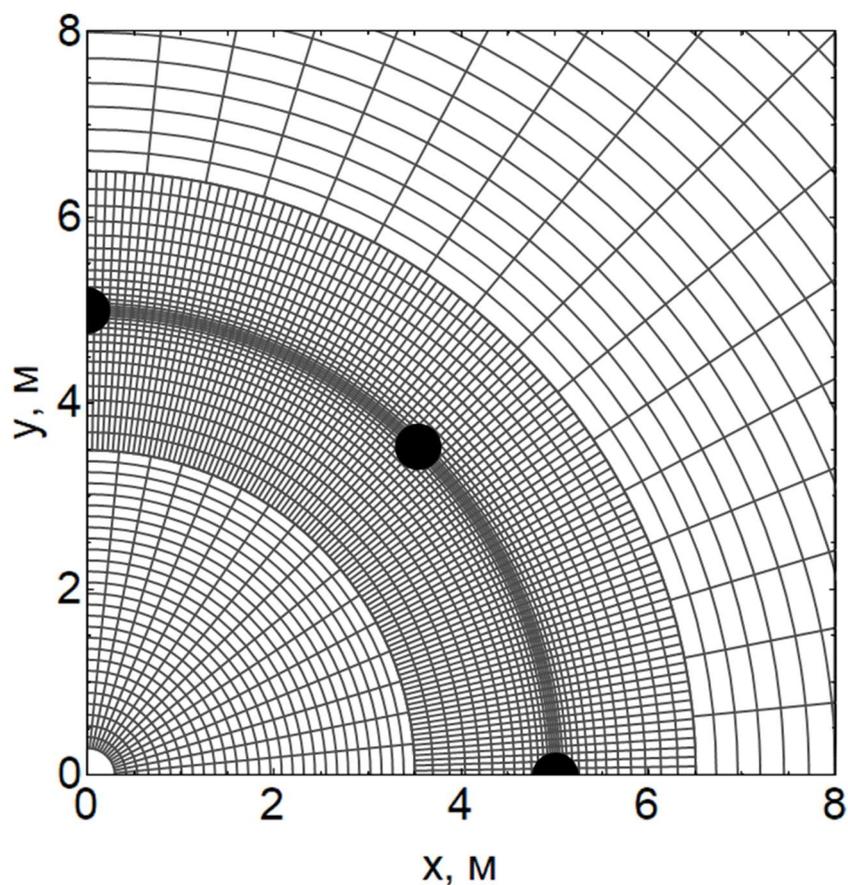


Рисунок 3.2 – Пример дискретизации расчетной области

Численная реализация полученной математической модели осуществлялась с использованием метода конечных разностей в программе Frozen Wall, разработанной сотрудниками Горного института УрО РАН совместно с автором настоящей работы. Для дискретизации расчетной области использовалась регулярная неоднородная порядная сетка со сгущением вблизи замораживающих колонок (рисунок 3.2). Использовалась явная схема по времени первого порядка и схема второго порядка точности (центральная разность) по пространству.

3.3 Параметризация модели по данным натуральных измерений

Как было сказано ранее, предложенная в разделе 3.2 математическая модель требует определенной параметризации, чтобы получаемые модельные температуры соответствовали экспериментально замеренным в КТ скважинах.

Предложенная модель использовалась для контроля состояния ЛПО при строительстве двух объектов – скипового ствола Дарасинского рудника и стволов Петриковского ГОК. Соответственно параметризация модели осуществлялась для условий данных объектов.

Вокруг проектируемого скипового ствола Дарасинского рудника было пробурено 39 замораживающих скважин. Диаметр замораживающего контура равен 15,4 м, а расстояние между устьями соседних замораживающих колонок примерно равно 1,24 м. При этом диаметр проектируемого шахтного ствола $D_{ст}$ составлял 8 м (рисунок 3.3). Диаметр контура замораживания D_3 равен 15,4 м.

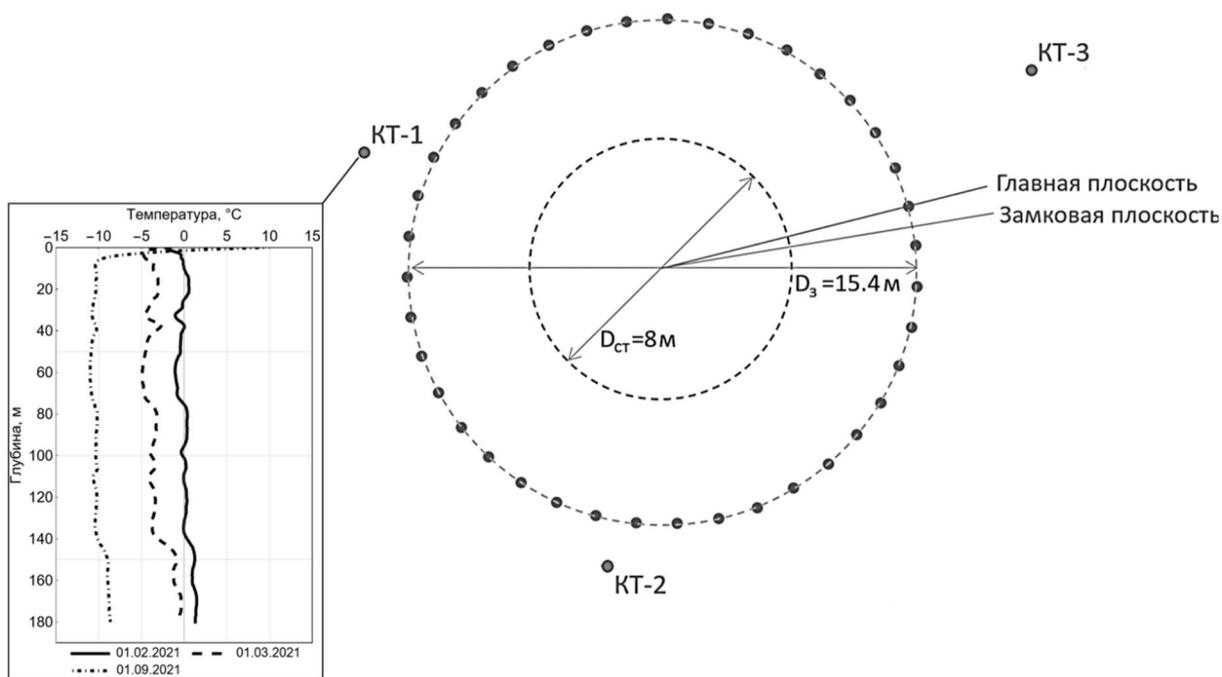


Рисунок 3.3 – Схематичное изображение контура замораживающих колонок и контрольно-термических скважин (КТ1, КТ2, КТ3) для условий скипового ствола Дарасинского рудника

Моделирование для условий Дарасинского рудника осуществлялось для всех стадий существования ЛПО: стадия активного замораживания, стадия пассивного замораживания и стадия размораживания. Для моделирования каждой стадии и переходов между ними брались временные зависимости расхода рассола и температуры хладоносителя, измеренные на входе и выходе рассола из замораживающих колонок. Данные зависимости представлены на рисунке 3.4.

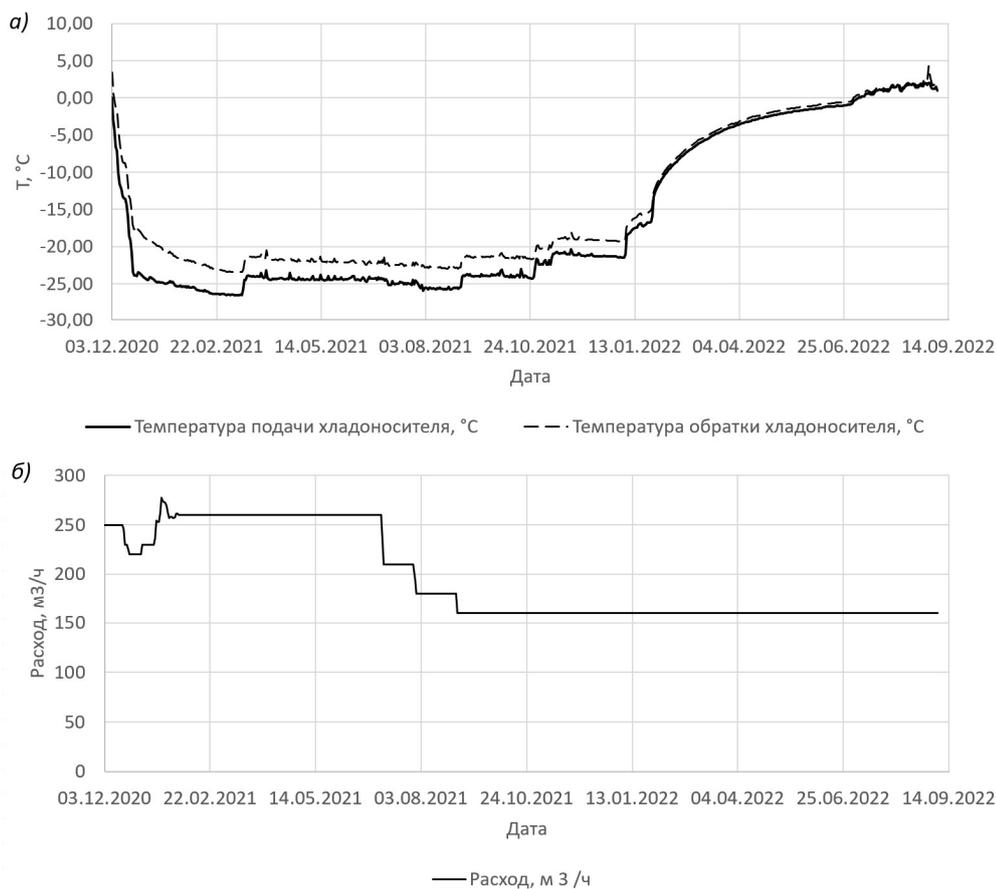


Рисунок 3.4 – Временные зависимости температуры (а) и объемного расхода (б) рассола в замораживающих колонках для условий скипового ствола Дарасинского рудника

Начало стадии активного замораживания – 3 декабря 2020 года (рисунок 3.4а). Понижение температуры входящего рассола до проектного значения около $-25\text{ }^\circ\text{C}$ происходило в интервале с 3 по 19 декабря 2020 года. После чего температура до 14 марта 2021 года продолжала плавно уменьшаться. После 14 марта температура повысилась на $3\text{ }^\circ\text{C}$, что было связано с переходом на режим пассивного замораживания. В дальнейшем до сентября 2021 температура плавно понижалась, что было связано с естественными процессами в массиве, его постепенным промораживанием. 8 сентября температура снова резко повысилась на $2\text{ }^\circ\text{C}$, что было связано с изменением режима работы замораживающей станции. Такие же резкие повышения температуры происходили 28 октября 2021 г, 7 января 2022 г. С конца января 2022 года началось постепенное повышение температуры хладоносителя (стадия размораживания), в результате чего к июлю 2022 года его температура достигла $0\text{ }^\circ\text{C}$.

Расход рассола в замораживающем контуре в течение всего рассматриваемого периода замораживания также претерпевал изменения. В начальный период с 25 ноября по 28 января он варьировался в интервале от 220 до $278\text{ м}^3/\text{час}$, после чего поддерживался

на уровне 260 м³/час. С 5 июля 2021 года он уменьшался сначала до 210 м³/час, а потом до 180 и 160 м³/час (рисунок 3.46).

В качестве начальных теплофизических параметров для участка скипового ствола Дарасинского рудника брались результаты лабораторных замеров, представленные в таблице 2.1. В таблице 3.1 представлено соответствие моделируемых номеров слоев с их литологией и интервалом глубин.

Таблица 3.1 – Моделируемые слои участка скипового ствола Дарасинского рудника

№ слоя	Литология слоя	Интервал глубин, м
1	Песок	2,1-18
2	Суглинок	18-24,5
3	Песок, сугл., супесь	24,3-33,5
4	Супесь	33,5-41,1
5	Супесь, сугл.	41,1-50
6	Суглинок	50-60,5
7	Песок глин., супесь	60,5-72,3
8	Суглинок	72,3-82,9
9	Супесь, суглинок	82,9-97,3
10	Мел песчий, супесь	97,3-109,3
11	Песок, супесь	109,3-124,4
12	Песок, суглинок	124,4-133,7
13	Песчаник	133,7-141,5
14	Глина, известняк	141,5-154,8
15	Глина, глина аргилл.	154,8-162,1
16	Глина аргилл.	162,1-182,1
17	Глина аргилл.	182,1-187,1

Далее в процессе натурального мониторинга температур в трех КТ скважинах для каждого из слоев пород производились корректировки модельных теплопроводностей и влажности породного массива для минимизации функционала (3.9) и обеспечения наилучшего соответствия между измеренными и модельными температурами в местах расположения КТ скважин. Распределение температур в КТ скважинах представлено в разделе 2.3.

На рисунке 3.5 показано как корректировались теплопроводности и влагосодержание породного массива с течением времени на примере трех слоев пород (в скобках у названия каждого слоя на рисунке 3.5 приводится номер слоя). В этом смысле настраиваемые в модели теплофизические свойства являются некоторыми эффективными свойствами среды, включающими в себя информацию о ряде других физических процессов и особенностях замораживания.



Рисунок 3.5 – Динамика эффективных теплофизических параметров пород при параметризации модели для условий скипового ствола Дарасинского рудника в разные моменты времени: а) теплопроводность в зоне льда, б) теплопроводность в зоне охлаждения, в) – влагосодержание

Таблица 3.2 – Пример сопоставления модельных и измеренных температур для слоев теплофизической модели скипового ствола Дарасинского рудника после калибровки на 09.07.2021

№ слоя	Отметка середины слоя, м	Температура в КТ1, °С		Отклонение вычисленных температур от измеренных в скважине КТ1, °С	Температура в КТ2, °С		Отклонение вычисленных температур от измеренных в скважине КТ2, °С	Температура в КТ3, °С		Отклонение вычисленных температур от измеренных в скважине КТ3, °С	Среднеквадратическое отклонение вычисленных температур от измеренных по всем КТ скважинам, °С
		Изм.	Мод.		Изм.	Мод.		Изм.	Мод.		
1	10,05	-9,12	-9,48	-0,36	-6,35	-6,03	0,32	2,74	2,80	0,06	±0,28
2	21,25	-9,11	-9,17	-0,06	-5,97	-5,74	0,23	3,91	3,98	0,07	±0,14
3	29,00	-9,49	-9,85	-0,36	-6,61	-6,49	0,12	2,39	2,48	0,09	±0,26
4	37,30	-8,83	-9,10	-0,27	-6,30	-5,61	0,69	2,37	2,55	0,18	±0,44
5	45,55	-9,56	-9,85	-0,29	-6,60	-6,57	0,03	2,48	2,57	0,09	±0,18
6	55,25	-9,87	-10,13	-0,26	-7,11	-6,93	0,18	2,37	2,44	0,07	±0,19
7	66,40	-10,09	-10,31	-0,22	-7,23	-7,07	0,16	2,81	2,83	0,02	±0,16
8	77,60	-9,45	-9,57	-0,12	-6,33	-6,10	0,23	3,38	3,32	-0,06	±0,15
9	90,10	-9,45	-9,88	-0,43	-6,58	-6,53	0,05	2,78	2,81	0,03	±0,25
10	103,30	-9,42	-9,69	-0,27	-7,09	-6,82	0,27	3,19	3,21	0,02	±0,22
11	116,85	-9,44	-9,43	0,01	-7,12	-6,77	0,35	2,78	2,92	0,14	±0,22
12	129,05	-9,45	-9,50	-0,05	-6,98	-6,56	0,42	3,51	3,53	0,02	±0,24
13	137,60	-9,19	-9,15	0,04	-7,58	-7,62	-0,04	7,10	7,07	-0,03	±0,04
14	148,15	-7,71	-8,07	-0,36	-5,42	-5,43	-0,01	5,04	5,12	0,08	±0,21
15	158,45	-7,58	-7,47	0,11	-5,23	-5,47	-0,24	5,08	5,14	0,06	±0,16
16	172,10	-7,33	-7,00	0,33	-4,94	-5,19	-0,25	5,62	5,68	0,06	±0,24
17	184,60	-6,50	-6,23	0,27	-4,36	-4,77	-0,41	6,07	6,11	0,04	±0,28

В таблице 3.2 представлены модельные и измеренные температуры, а также их расхождения в КТ скважинах после параметризации большей части слоев теплофизической модели на 09.07.2021.

Многолетний опыт термометрических наблюдений показал, что минимальные отклонения при расчетах должны быть получены на наиболее удаленной от контура замораживающих колонок скважине КТ3. При отклонениях по скважинам КТ1 и КТ2 более чем на $\pm 1^{\circ}\text{C}$, по КТ3 — более чем на $0,5^{\circ}\text{C}$ в каком-либо из слоев модели, производится калибровка его теплофизических параметров до наилучшего соответствия модельных и измеренных температур. Расположение скважины КТ3 позволяет

достоверно оценивать и контролировать положение внешней границы ЛПО по температуре начала замерзания воды в породе.

В случае Петриковского ГОК контроль ЛПО и следовательно параметризация модели осуществлялись только на стадии размораживания. Два проходимых ствола имели диаметр 10,5 м и одинаковую конструкцию, схематически показанную на рисунке 3.6. Расстояние между стволами составляло 100 м. Основная бетонная крепь, возводимая в первые дни после начала проходки, имела толщину от 0,5 м до 1,0 м. Между тубингом и основной крепью также был залит бетон толщиной 0,3 м. Способ проходки ствола основывался на буровзрывных работах. Возведение тубингов началось после того, как ствол был пройден на 300 м в глубину.

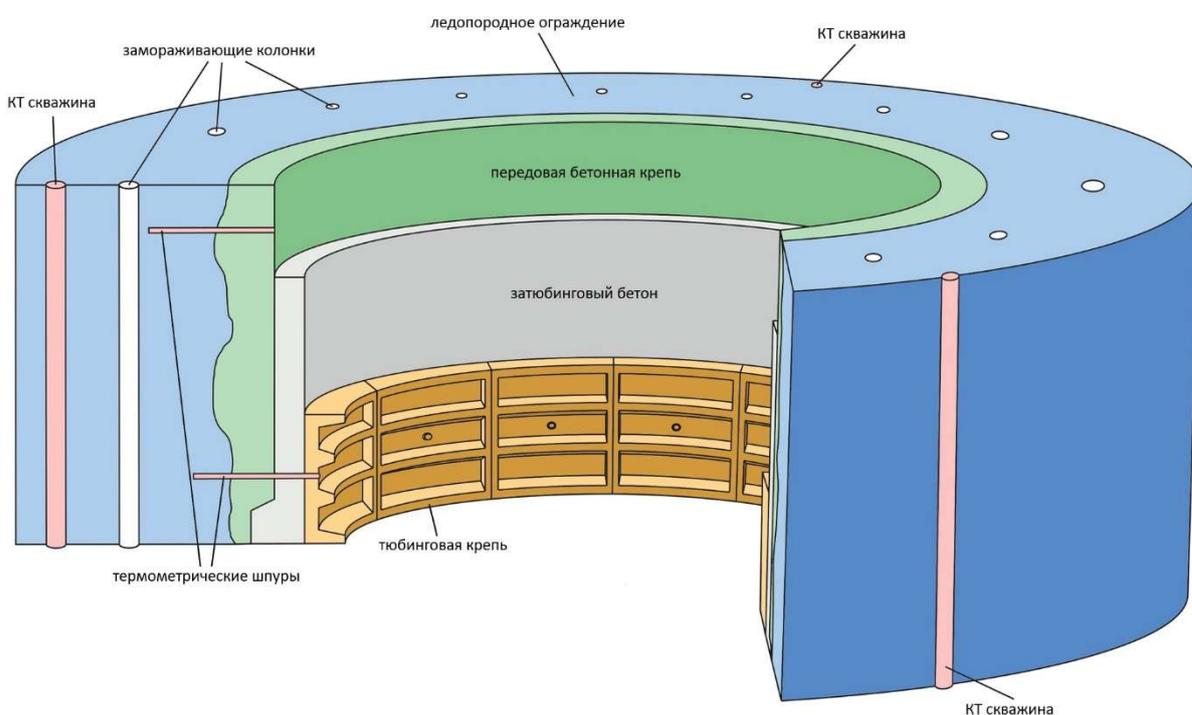


Рисунок 3.6 – Схематическое изображение конструкции стволов Петриковского ГОК

В систему искусственного замораживания пород вошли четыре холодильные установки суммарной холодопроизводительностью ~1600 кВт на один ствол. Контур замораживания состоял из 41 трубы, установленной в скважинах глубиной 275 м. Замораживающие скважины пробурены по круговому контуру радиусом 8,2 м и расстоянием 1,25 м между центрами скважин. Температура охлаждающей жидкости на впуске составляла -28 °С на первой (активной) стадии замораживания и -14 °С на второй.

Процесс оттаивания ЛПО не включал в себя использование размораживающих колонок. При этом циркуляция теплоносителя в замораживающих колонках сохранялась с ненулевыми скоростями. Это позволило снизить энергопотребление и обеспечить более равномерное распределение тепловых потоков в замораживающей колонке.

Следует отметить, что температура теплоносителя при этом всегда была несколько выше температуры породы вблизи замораживающей колонки. Это произошло из-за поступающего тепла из атмосферы и работы насосов в трубопроводной сети на поверхности. В этом режиме холодильные установки могут быть немедленно включены для возобновления работы системы искусственного замораживания в случае необходимости.

Возле каждого ствола вне контура замораживающих труб пробурено по три КТ скважины (рисунок 3.6). Глубина бурения была несколько меньше, чем для замораживающих колонок (255 м). Для каждого ствола скважины №1 и №2 располагались на расстоянии 1,25 м от ближайших замораживающих колонок, а скважина №3 – на расстоянии 2,25 м от ближайшей замораживающей колонки. Вид сверху с расположением КТ скважин для одного из стволов показан на рисунке 3.8.

Во внутреннем контуре замораживания не было КТ скважин во время проходки ствола. Внешние КТ скважины не смогли предоставить информацию о температуре горных пород вблизи крепи. Как было описано ранее в разделе 2.4 после отключения холодильных установок обычно бурят шпуров через технологические отверстия в тубингах. В полученные шпуров опускают термометры и таким образом получают информацию о температуре закрепного пространства. Для автоматизации процесса замера температуры в пробуренные шпуров были установлены специальные горизонтальные температурные датчики длиной 2 м. Эти датчики были оборудованы оптоволоконной системой термометрического контроля (DTS), описанной в разделе 2.4. Примеры распределения температуры в горизонтальных КТ шпуров представлены на рис. 2.22 и 2.23.

В таблице 3.3 представлены используемые при моделировании начальные теплофизические свойства пород. Эти величины были получены в ходе лабораторных замеров. Расположение каждого слоя породы представлено на рисунке 2.1.

Таблица 3.3 – Сопоставление модельных и измеренных температур для слоев в модели скипового ствола Петриковского рудника после калибровки на 09.07.2021

Литология	Плотность, г/см ³	Теплопроводность, Вт/(м·°C)		Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)		Влагосодержание кг/кг	Температура начала кристаллизации, °C
		Зона охлаждения (+10°C)	Зона льда (-10°C)	Зона охлаждения (+10°C)	Зона льда (-10°C)		
Песок	1.70÷2.19	1.29÷2.70	1.53÷4.31	983÷1566	886÷1421	0.084÷0.260	-0.05 ÷ -1.03
Глина	1.96÷2.12	1.48÷1.77	1.50÷2.09	1334÷1427	1128÷1398	0.204÷0.302	-0.14 ÷ -2.12

Мел, мергель	1.86÷1.97	1.28÷1.40	2.09÷2.46	1600÷1724	1104÷1164	0.314÷0.380	-0.05÷-0.14
Песчаник	2.26÷2.55	2.24÷5.58	3.19÷6.3	746÷1016	721÷857	0.014÷0.088	-0.11÷-0.7
Алеврит	1.87÷2.05	1.47÷1.64	2.17÷2.2	1372÷1491	1121÷1152	0.224÷0.275	-0.14÷-0.2
Алевролит	2.09	1.68	2.28	1412	1106	0.241	-0.2
Глина аргил., глина тяжелая	1.98÷2.15	1.03÷1.46	1.25÷1.80	1284÷1532	1087÷1278	0.186÷0.289	-0.81÷-1.45

На рисунках 3.7 и 3.8 приведены результаты моделирования размораживания ЛПО для слоя песчаника, залегающего на глубине 150 м и имеющего диапазон температур плавления льда от 0,51 до 0,18 °С. Этот слой имеет самые высокие скорости замерзания и оттаивания. Температурные кривые на рисунке 3.7 рассчитаны для различных моментов после остановки холодильных установок и после параметризации модели хорошо совпадают с экспериментальными данными. Профиль рисунка ориентирован радиально поперек ЛПО, а ноль оси абсцисс соответствует центру ствола.

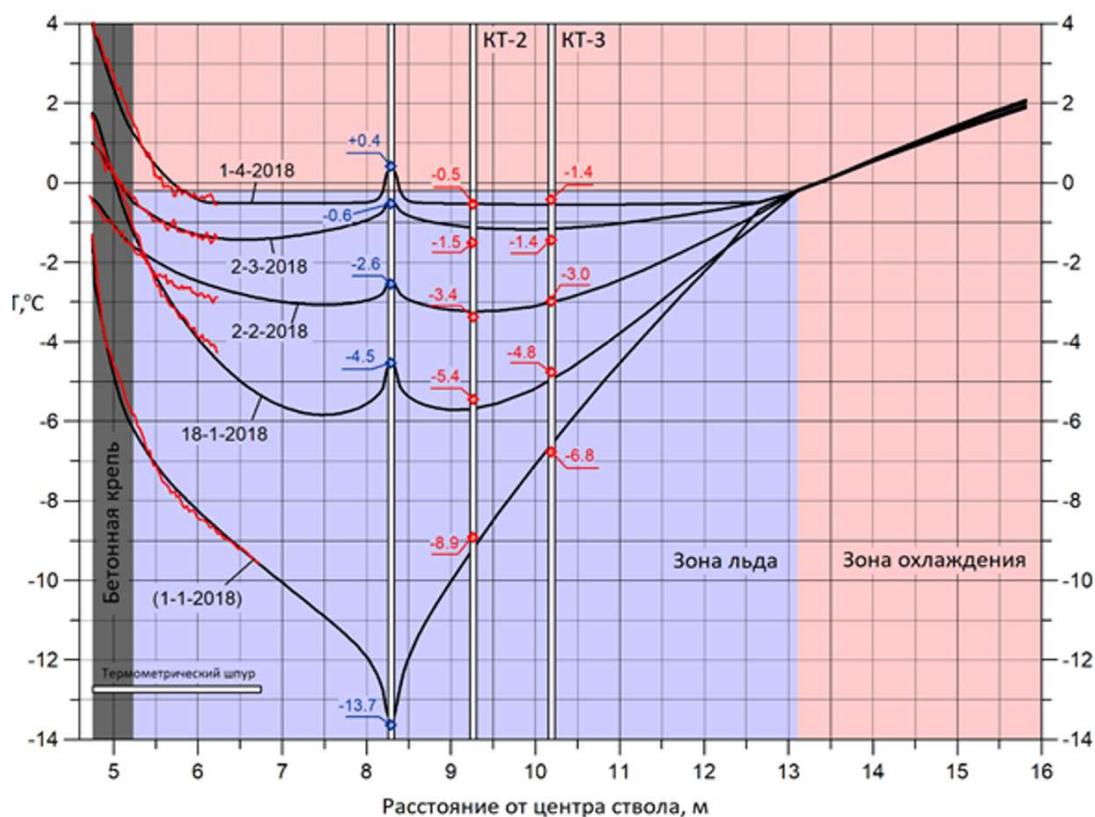


Рисунок 3.7 – Модельные температуры в оттаивающем слое песчаника (скиповой ствол Петриковского рудника) в разное время после остановки холодильных установок (черные кривые) и экспериментальные данные для сравнения: данные с DTS датчиков (красные кривые), температуры, измеренные в вертикальных КТ скважинах (красные квадраты и цифры), температура циркулирующего теплоносителя (темно-синие квадраты и цифры)

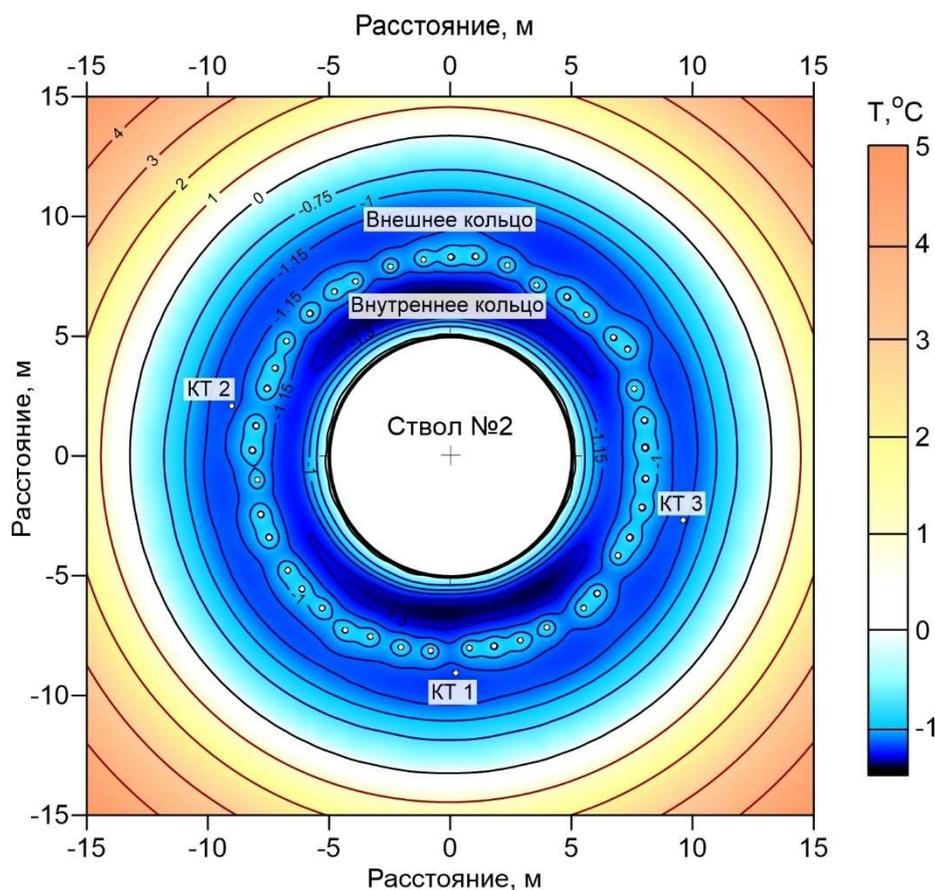


Рисунок 3.8 – Модельное температурное поле (вид сверху) в слое песчаника вокруг скипового ствола Петриковского рудника через 40 дней после остановки холодильных установок

Также на рисунке 3.7 приведены экспериментальные данные для сравнения с модельными температурами. Отклонение между экспериментальными и модельными температурами составляет менее $\pm 0,5$ °С. Проведенное динамическое моделирование подтверждает, что циркуляция теплоносителя нагревает ЛПО вокруг замораживающих колонок и делит ее на две части: внутреннее и внешнее кольца. Это хорошо видно на рисунке 3.7 и особенно на рисунке 3.8.

3.4 Выводы по главе

1. Сформулирована математическая модель, описывающая нестационарный процесс искусственного замораживания пород при строительстве шахтного ствола. Модель основана на решении уравнения теплопроводности в энтальпийной постановке. С помощью функции удельной энтальпии учитываются фазовые превращения поровой воды. В модели также введено условие, что в месте установки контрольно-термических скважин модельная

температура должна совпадать с экспериментально замеренной в скважине. Данное условие приводит к необходимости решения обратной задачи.

2. Для решения обратной задачи использована регуляризация Тихонова, которая позволяет заменить жесткое условие равенства модельных и экспериментальных температур на условие минимизации функционала, зависящего от разности модельных и экспериментальных температур. Минимизация функционала достигается путем подбора теплофизических свойств породного массива – теплопроводности и влагосодержания. Единственность решения обратной задачи достигается путем задания условия малости изменения данных теплофизических свойств. Также модель учитывает движение поровых вод (путем решения уравнений баланса массы и Дарси) и влияние температуры шахтного воздуха в стволе после начала его проходки.
3. Для условий скипового ствола Дарасинского рудника и стволов Петриковского ГОК проведена параметризация математической модели искусственного замораживания и проведен сравнительный анализ модельных и экспериментально замеренных температур в контрольно-термических скважинах. В случае Дарасинского рудника параметризация осуществлялась на всех стадиях существования ледопородного ограждения: активного замораживания, пассивного замораживания и размораживания. Для Петриковского ГОК параметризация модели проводилась только для стадии размораживания.

4 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

4.1 Исследование временной динамики поля температур в объеме замороженных пород

Вывод о несущей способности ЛПО во всем интервале замораживаемых пород делается с привлечением данных натурного мониторинга искусственного замораживания пород в КТ скважинах и результатов численного моделирования, которое позволит получить распределение температурных полей во всем объеме замороженных пород.

В настоящей работе исследование несущей способности ЛПО рассматривалось относительно массива пород в окрестности скипового ствола Дарасинского рудника. В связи с этим для данного рудника проводилось исследование временной динамики поля температуры в объеме замороженных пород на параметризованной модели искусственного замораживания, представленной в разделе 3. Были исследованы переход со стадии активного замораживания на стадию поддержания фиксированной толщины ЛПО (пассивное замораживание) и затем на стадию размораживания пород.

Для моделирования различных стадий замораживания брались временные зависимости расхода рассола и температуры хладоносителя, измерявшиеся на входе и выходе рассола из замораживающих колонок. Данные зависимости были представлены ранее на рисунке 3.4.

Начальные значения всех теплофизических свойств породного массива, использованных при расчетах, брались на основании лабораторных исследований образцов пород, результаты которых представлены в таблице 2.1. Как отмечалось ранее, до глубины 143 м скипового ствола присутствует палеодолина, сложенная нестратифицированными смешанными отложениями. Однако анализ измерений температуры в КТ скважинах выявил неравномерное охлаждение массива на этом участке. В связи с этим интервал в последствие был разделён на слои по преобладающему типу пород. В пределах 185-метровой зоны замораживания выделено 17 укрупнённых слоёв, для каждого из которых далее выполнялся отдельный теоретический анализ. Однако в настоящей работе подробно рассматриваются три из них. В таблице 4.1 представлены теплофизические свойства для трех выбранных слоев пород – песка, супеси и глины.

Рассчитанные распределения температуры представлены на рисунке 4.1 для всех трех слоев и двух времен – момента перехода со стадии активного замораживания на

пассивное и момента в период размораживания. На рисунке 4.2 представлены графики средней температуры ЛПО и толщины ЛПО в различные моменты времени. Средняя температура ЛПО рассчитывалась путем пространственного усреднения поля температур в области с температурами ниже температуры начала кристаллизации, соответствующего слоя. Толщина ЛПО рассчитывалась по соответствующей для каждого слоя изотерме температуры полной кристаллизации. Выбор данных изотерм связан с тем, что при температуре полной кристаллизации в породе остается наименьшее количество незамерзшей влаги. Зона $R < 4$ м не отображена на графиках, поскольку она соответствует зоне строящегося ствола, а при расчете толщины ЛПО она не учитывается.

Таблица 4.1 – Теплофизические свойства слоев пород

Слой	Интервал глубин, м	Температура нетронутой породы, °С	Температура начала кристаллизации, °С	Температура полной кристаллизации, °С	w, кг/кг	Теплопроводность в зоне льда, Вт/(м·°С)	Теплопроводность в зоне охлаждения, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость в зоне льда, Дж/(кг·°С)	Удельная теплоемкость в зоне охлаждения Дж/(кг·°С)	Плотность, кг/м ³
Песок	2.1–18	9.5	-0.08	-1	0.117	3,9	2,8	908	1096	2110
Супесь	82.9-97.3	8.5	-0.07	-3	0.167	3,27	2,36	996	1131	2200
Глина	141.5-154.8	8.88	-0.68	-5	0.177	1,51	1,16	993	1259	2160

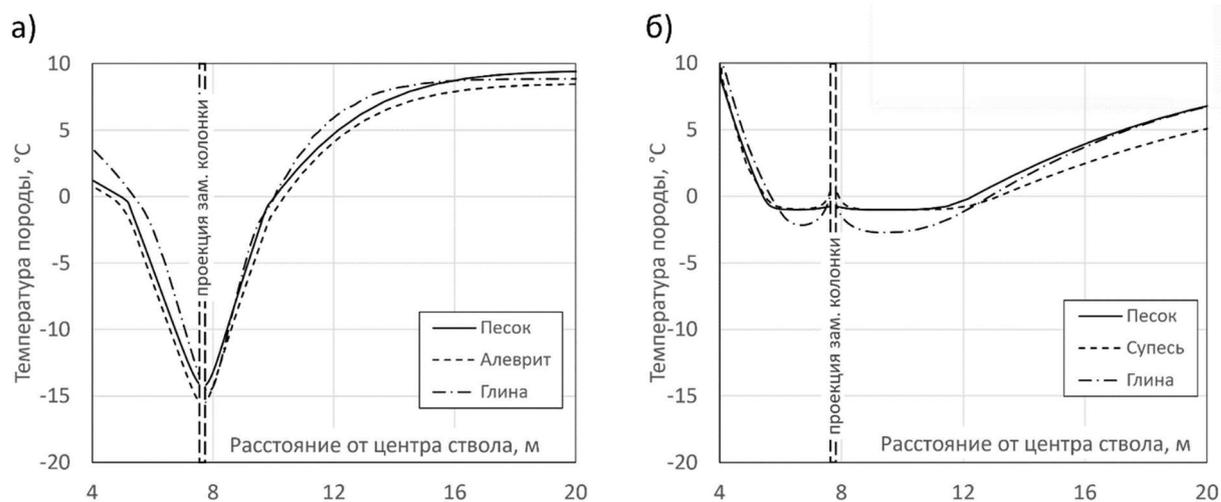


Рисунок 4.1 – Радиальные распределения температуры вдоль замковой плоскости ЛПО в моменты времени 4 месяца (переход с активного на пассивное замораживание) (а) и 20 месяцев (период размораживания) (б)

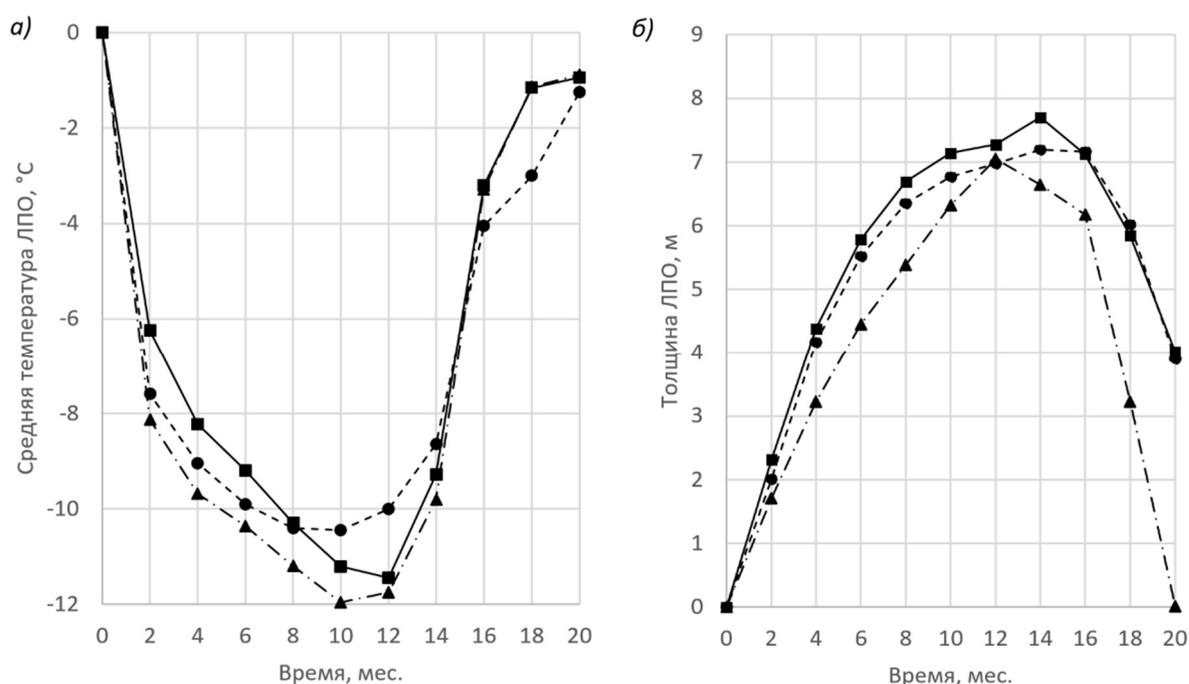


Рисунок 4.2 – Временные зависимости средней температуры (а) и толщины (б) ЛПО для трех различных слоев пород

Если на стадии активного замораживания пород разница температур и градиент температур в зоне ЛПО максимальны, то с течением времени за счет постепенного промораживания пород градиент уменьшается, а после снижения холодильной мощности замораживающей станции в фазе пассивного замораживания разница температур в зоне ЛПО также быстро убывает. Это влияет на среднюю температуру ЛПО (см. рисунок 4.2а) и, следовательно, на среднюю прочность замороженных пород.

Следует также отметить, что минимальные температуры на кривых на рисунке 4.1 всегда выше температуры замораживающего рассола, что связано с термическим сопротивлением рассола в пограничном слое вблизи стенки колонки, термическим сопротивлением пород между стенкой замораживающей колонки и замковой плоскостью ЛПО.

Из рисунка 4.2б можно видеть, что толщина ЛПО для песка и супеси возрастает до 14 месяцев, а затем снижается до конца моделируемого времени и в конечный момент становится равной примерно толщине в 4 месяца. В то же время толщина ЛПО для глины возрастает до 12 месяцев, а затем стремительно снижается вплоть до нуля к концу времени моделирования. Это связано с тем, что из всех трех слоев у глины толщина ЛПО считается по наиболее низкой температуре полной кристаллизации -5°C , которую труднее поддерживать системе замораживания в пассивном режиме. В модели также учитывается то, что в интервале между 10 и 12 месяцами в рассматриваемых слоях пород

проходится шахтный ствол – появляются теплопритоки со стороны воздушного пространства ствола.

Также интерес представляет эволюция ЛПО спустя длительный срок после перехода от пассивного замораживания к размораживанию. Однако данные экспериментальных замеров температуры массива для Дарасинского рудника имелись лишь на период до 9 месяцев после начала размораживания, в то время как для Петриковского ГОК имелись данные на период до 12 месяцев после начала размораживания. По этой причине моделирование и анализ состояния ЛПО на длительном периоде после размораживания проводилось на примере другого объекта – рудника Петриковского ГОК.

Таким образом, проведено численное моделирование длительного размораживания пород. Принималось, что после завершения возведения бетонной крепи, тубинговой крепи и тампонирувания закрепного пространства циркуляция теплоносителя остановлена, а замораживающие трубы демонтированы. Тепловой поток через стенку ствола был постоянным в течение всего расчетного периода. Установлено, что ЛПО достигает температуры плавления льда в различных породах через 80-120 дней после остановки системы замораживания. Затем толщина ЛПО под действием приходящей теплоты медленно уменьшается в размерах. Размораживание массива горных пород в это время может иметь неоднородную структуру и локально разрушаться внешним (горным и подземным) давлением. Однако ЛПО может долго выдерживать давление, если его размеры остаются достаточно большими (рисунок 4.3).

Температурные кривые на рисунке 4.3 показывают, что замороженная порода оттаивает медленно и полностью переходит в область положительных температур примерно через 3-5 лет.

4.2 Неоднозначность существующих критериев оценки несущей способности ледопородного ограждения

На сегодняшний день в инженерной практике оценка несущей способности ЛПО осуществляется на основе данных о распределениях температур, по которым инженер должен сделать вывод о том, достигнуты ли требуемые толщины ЛПО. Толщины ЛПО из данных о распределении температур определяются по выбранной изотерме (0 °С или ниже) и сравниваются с расчетной толщиной, полученной из механического анализа. При проведении механического анализа обычно принимается, что температура ЛПО распределена однородно по объему замороженных пород [131]. При этом такая средняя температура равна заданной отрицательной величине, при которой были определены

прочностные свойства пород в ходе лабораторных испытаний и с использованием которых были рассчитаны проектные толщины ЛПО.

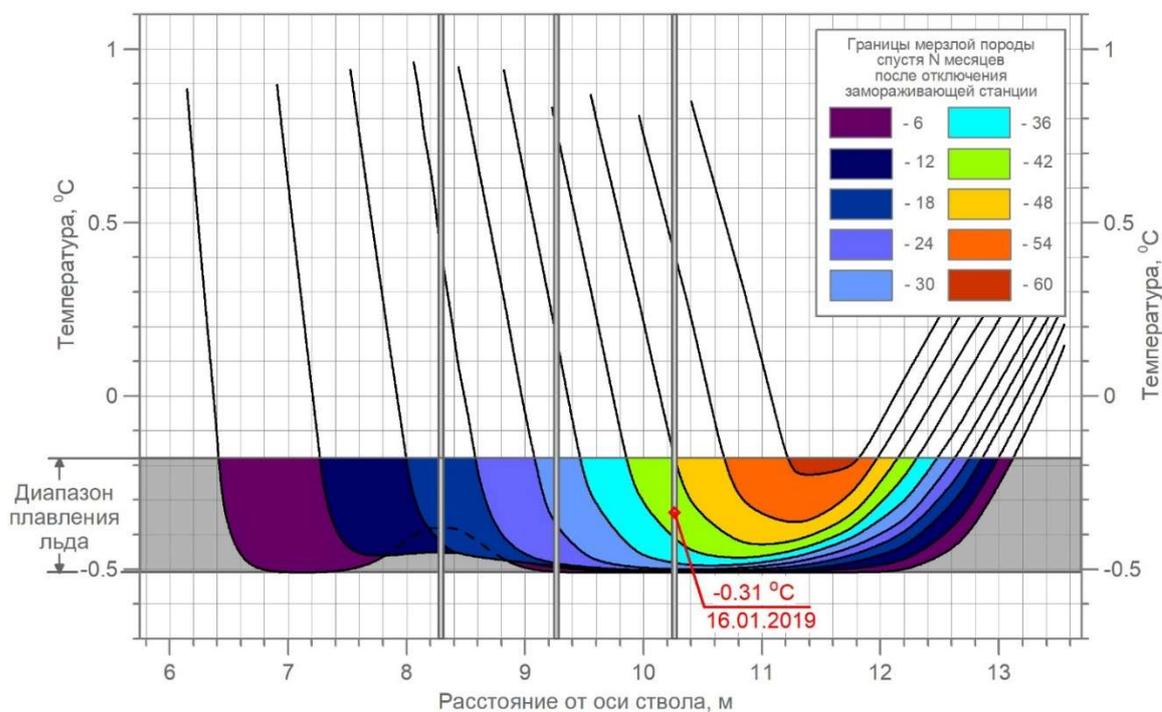


Рисунок 4.3 – Результаты численного моделирования при длительном времени оттаивания в слое песчаника на глубине 150 м

Данный подход имеет очевидное достоинство, связанное с оперативностью оценок несущей способности ЛПО, однако в своей основе он содержит ряд упрощений, которые в некоторых практических ситуациях могут оказаться очень грубыми [113].

Среди них:

1. Изменение физико-механических и прочностных свойств грунтов в зависимости от температуры.
2. Тепловое расширение влажных пород при замерзании в них воды.
3. Выпирание влаги из области замороженных пород, приводящее к повышению внешней нагрузки на боковую стенку ледопородного цилиндра.
4. Влияние морозного пучения на напряженно-деформированное состояние ЛПО.

Все эти факторы связаны с неучетом взаимного влияния механической и тепловой задач при моделировании ЛПО.

Рассмотрим более подробно одно из следствий неучета температурных изменений физико-механических и прочностных свойств замороженных пород. Проектные толщины ЛПО, определенные из механического анализа по средней

однородной температуре ЛПО, обычно удовлетворительно работают на практике на стадии активного замораживания пород. Однако при переходе на стадию пассивного замораживания мощность замораживающей системы снижается. В этом случае зона отрицательных температур обычно продолжает расширяться, но средняя температура ЛПО может существенно увеличиться [50]. Последнее связано с увеличением температуры рассола в замораживающих колонках. В этом случае становится некорректным сравнение фактических толщин ЛПО по той же изотерме с расчетными толщинами ЛПО. Так как в этом случае сравниваются толщины для совершенно разных средних температур ЛПО.

Несмотря на то, что толщина ЛПО по изотерме фактического замерзания свободной воды продолжает расти, фактическая несущая способность ЛПО может уменьшаться из-за увеличения его средней температуры. Она также может стать ниже требуемой несущей способности ЛПО, что может приводить к возникновению серьезных деформаций стенок ствола, к поступлению подземных вод в ствол. При значительных повышениях температуры горных пород в ЛПО могут образовываться «окна», через которые подземные воды будут поступать в ствол.

Возможна и противоположная ситуация, когда принимают решение очень медленно понижать мощность замораживающей станции при переходе на пассивный режим замораживания. Это приводит к тому, что средняя температура ЛПО сохраняет свои проектные значения, но при этом толщина ЛПО продолжает расти, что приводит к перемораживанию породного массива и влечет за собой неэффективное использование холодильной мощности.

Все вышесказанное указывает на то, что для оценки несущей способности ЛПО помимо критерия толщины ЛПО необходимо использовать критерий средней температуры ЛПО. В этом смысле использование двух различных критериев в задаче об определении несущей способности ЛПО может приводить к не единственности решения или его неоднозначности. Таким образом, становится нетривиальным определение несущей способности ЛПО во времени.

На примере скипового ствола Дарасинского рудника можно продемонстрировать неоднозначность определения несущей способности ЛПО по критериям толщины и средней температуры ЛПО. На рисунке 4.2б толщина ЛПО у песка и супеси в моменты времени 4 и 20 месяцев сопоставимы, однако средняя прочность замороженных пород для момента времени 20 месяцев оказывается в несколько раз ниже средней прочности замороженных пород в момент времени 4 месяца. Об этом можно судить по средней температуре ЛПО на рисунке 4.2а, а также по эмпирическим зависимостям прочностных

и деформационных характеристик от температуры (см. таблицу 4.2), полученных при аппроксимации данных лабораторных испытаний исследуемых образцов пород (см. таблицу 2.1).

Таблица 4.2 – Линейные аппроксимации температурных функций предельно-длительных значений прочностных свойств, а также деформационных характеристик мерзлых пород (T – температура, °С)

Слой	Структурное сцепление, МПа	Тангенс угла внутреннего трения	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Коэффициент нелинейной деформации, МПа
Песок	$0,814 - 0,121 \cdot T$	$0,436 - 0,0047 \cdot T$	$0,842 - 0,326 \cdot T$	$5,749 - 1,407 \cdot T$
Супесь	$0,729 - 0,117 \cdot T$	$0,304 - 0,0046 \cdot T$	$0,476 - 0,381 \cdot T$	$6,790 - 1,451 \cdot T$
Глина	$0,447 - 0,119 \cdot T$	$0,080 - 0,0072 \cdot T$	$1,095 - 0,276 \cdot T$	$8,377 - 0,348 \cdot T$

Проблема, связанная с неоднозначным соответствием между средней температурой и толщиной ЛПО, также становится сильно выраженной при попытке организации непрерывного управления данными параметрами для обеспечения их проектных значений и поддержания приемлемой несущей способности ЛПО. В рамках настоящей работы проведен анализ временной динамики ЛПО в условиях работы системы управления, поддерживающей либо среднюю температуру ЛПО на заданном значении, либо его толщину (поддерживать сразу два параметра не представлялось возможным).

Анализ проводился с помощью имитационного моделирования системы управления на ранее разработанной модели тепловых процессов в замораживаемом массиве горных пород. Моделирование искусственного замораживания пород проводилось для случая скипового ствола Дарасинского рудника на период до полугода с момента начала замораживания. Управление средней температурой и толщиной ЛПО осуществлялось с момента окончания стадии активного замораживания и перехода на пассивное замораживание. Моделирование проводилось только для одного слоя – глины.

В качестве управляющего параметра выступала температура рассола в замораживающих колонках, которая регулировалась с учетом проектной средней температуры или толщины ЛПО. Регулирование температуры рассола в замораживающих колонках при управлении средней температурой ЛПО осуществлялось с помощью следующего управляющего уравнения:

$$\frac{dT_{fb}}{dt} = K_a (T_a^* - T_a), \quad (4.1)$$

где K_a — параметр, отвечающий за степень (скорость) управления при управлении средней температурой ЛПО, $1/c$; T_a^* — проектная средняя температура ЛПО, $^{\circ}C$; T_a — средняя температура ЛПО в данный момент времени, $^{\circ}C$.

При управлении толщиной ЛПО температура рассола в замораживающих колонках регулировалась уравнением, аналогичным (4.1)

$$\frac{dT_{fb}}{dt} = -K_E(E^* - E), \quad (4.2)$$

где K_E — параметр, отвечающий за степень (скорость) управления при управлении толщиной ЛПО, $^{\circ}C/(m \cdot c)$; E^* — проектная толщина ЛПО, м; E — толщина ЛПО в данный момент времени, м.

Следует отметить, что значения параметров K_a и K_E в уравнениях (4.1) и (4.2) подбирались таким образом, чтобы управление осуществлялось как можно быстрее, но, чтобы при этом на замораживающих колонках не происходило чрезмерного перемораживания или нагрева, а значения средней температуры и толщины ЛПО не совершали значительных колебаний.

Результаты моделирования при управлении средней температурой ЛПО представлены на рисунке 4.4, при управлении толщиной ЛПО – на рисунке 4.5. При управлении средней температурой ЛПО в качестве проектного значения принималась температура $-10^{\circ}C$. При управлении толщиной ЛПО проектное значение принималось в зависимости от изотермы, по которой происходило управление толщиной. Всего было рассмотрено три изотермы, для каждой из них принимались следующие толщины ЛПО: 5 м при изотерме $-2^{\circ}C$; 4,5 м при изотерме $-4^{\circ}C$; 4 м при изотерме $-6^{\circ}C$.

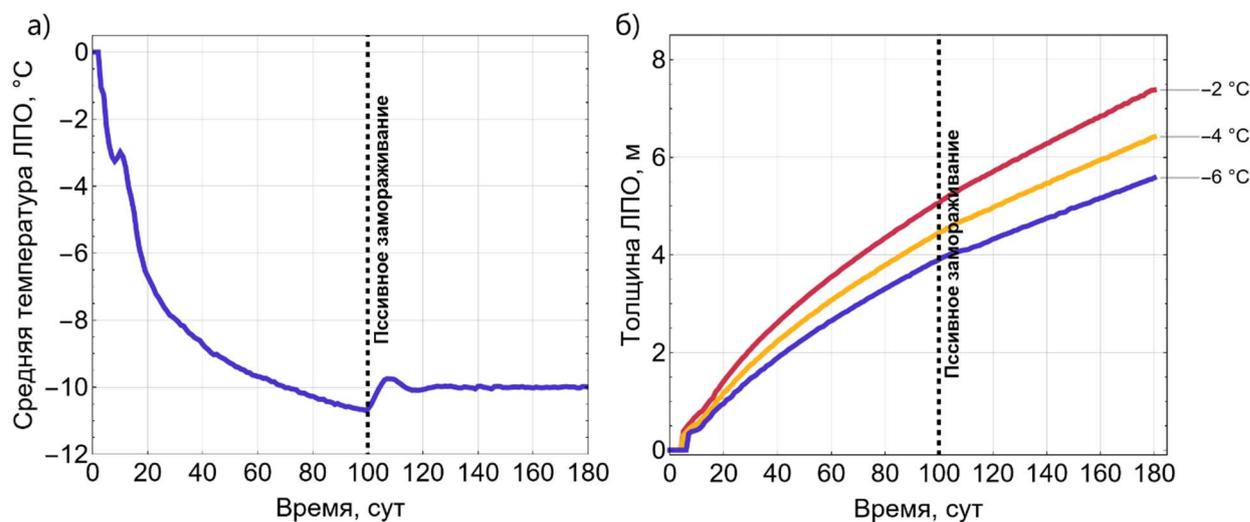


Рисунок 4.4 – Временные зависимости средней температуры ЛПО (а) и толщины ЛПО (б) при управлении средней температурой ЛПО для слоя глины

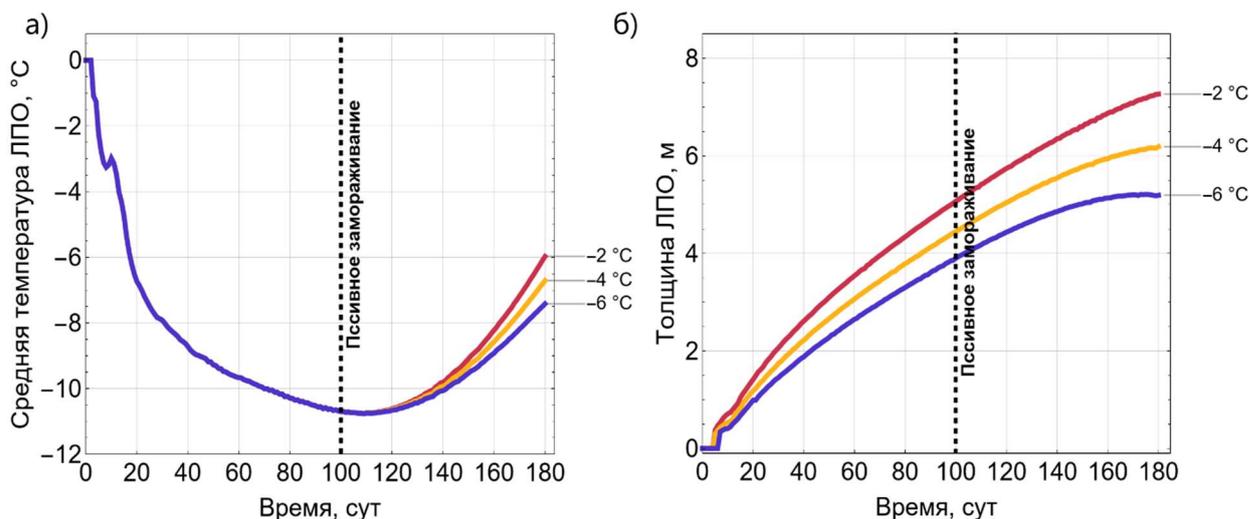


Рисунок 4.5 – Временные зависимости средней температуры ЛПО (а) и толщины ЛПО (б) при управлении толщиной ЛПО для слоя глины

Следует отметить, что температура в зоне ЛПО на этапах активного и пассивного замораживания распределена существенно неравномерно. Поэтому ЛПО со средней температурой $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ обычно имеет границы с изотермами, попадающими в диапазон температур от -2 до $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то время как рассмотрение граничной изотермы ЛПО по температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ не осуществлялось, так как оно заведомо создало бы намного меньшую величину средней температуры ЛПО.

В ходе моделирования было получено, что к моменту начала пассивного замораживания средняя температура ЛПО оказалась немного ниже проектного значения и, следовательно, при ее управлении она резко увеличивается и через 20 суток после начала пассивного замораживания выходит на стабильное поддержание проектного значения (см. рисунок 4.4а). При этом толщина ЛПО продолжает расти и даже спустя 80 суток после начала пассивного замораживания не выходит на постоянное значение и превышает проектные значения для всех изотерм (см. рисунок 4.4б).

При управлении толщиной ЛПО средняя температура ЛПО после начала пассивного замораживания первые 10 суток незначительно снижается, чтобы поддержать проектные значения толщины ЛПО (см. рисунок 4.5а). При этом данная температура становится ниже, чем проектное значение и практически достигает значения $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Несмотря на реализацию системы управления толщиной ЛПО, после начала фазы пассивного замораживания толщина ЛПО продолжает расти в силу инерционности процесса теплопереноса (изотермы границ ЛПО не могут мгновенно отреагировать на изменение температуры замораживающей колонки). В силу этого управляющее уравнение после 10 суток начинает стремительно поднимать температуру на замораживающих колонках, стараясь вывести толщину ЛПО на проектные значения.

Через 40 суток после начала пассивного замораживания средняя температура ЛПО начинает превышать проектное значение. Данное поведение характерно при управлении толщиной ЛПО по любой изотерме. «Инерционный» рост толщины ЛПО продолжается в течение 80 суток после начала пассивного замораживания и только после этого момента можно видеть начинающееся снижение толщины (см. рисунок 4.5б).

Сложность в управлении и поддержании толщины ЛПО связана со значительной инерционностью процесса теплопереноса. Так как скорость передачи теплоты через породный массив между замораживающими колонками и границами ЛПО конечна, то при увеличении температуры на замораживающих колонках теплота от них вглубь массива не может передаваться мгновенно, что приводит к принципиальной невозможности управления толщиной ЛПО. Регулирование параметром K_E не решает проблемы, так как при его постепенном увеличении начиная с некоторого значения задача становится неустойчивой: в определенный момент времени толщина ЛПО начинает стремительно падать, что ведет к необходимости вновь снизить температуру рассола в замораживающих колонках. Эффект от снижения температуры рассола проявляется не сразу, вследствие чего температура рассола снижается еще сильнее и приводит со временем к еще более сильному увеличению толщины ЛПО.

В итоге проведенное моделирование показывает, что управлять и поддерживать стабильно можно только среднюю температуру ЛПО, тогда как толщина ЛПО может в целом не поддаваться какому-либо управлению и поддержанию. Таким образом, решая задачу оценки и управления несущей способностью ЛПО при помощи двух критериев – средней температуры и толщины ЛПО можно получить неоднозначное решение или вовсе его отсутствие.

Исходя из всего вышесказанного можно сделать вывод, что необходима разработка нового критерия оценки несущей способности ЛПО, по которому задача определения несущей способности ЛПО будет иметь однозначное и единственное решение.

4.3 Разработка нового критерия оценки несущей способности ледопородного ограждения

С учетом полученного вывода в разделах 4.1-4.2 о неприменимости классического критерия оценки несущей способности ЛПО, в данном разделе предлагается и обосновывается новый критерий количественной оценки несущей способности ЛПО.

Идея нового критерия заключается в вычислении напрямую предельной несущей способности ЛПО P в каждый заданный момент времени. Под предельной несущей

способностью ЛПО понимается максимальная величина нагрузки, оказываемая горным давлением и гидростатическим давлением на внешнюю стенку ЛПО. Данная характеристика может быть рассчитана так, чтобы интегрально учитывать всю неоднородность прочностных и физико-механических свойств в объеме замороженных пород. В данной работе рассчитывать предельную несущую способность ЛПО предлагается по критерию прочности исходя из модифицированной формулы С.С. Вялова для расчета толщины ЛПО в неоднородном поле температур:

$$P = \frac{\bar{\Lambda}_{mean}}{\Lambda - 1} \varepsilon - \frac{\Lambda(\Lambda + 1)}{96(\Lambda - 1)^3} \Delta_c \varepsilon^3, \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{b}{a} \right)^{\Lambda - 1} - 1, \quad (4.4)$$

где a — радиус внутренней границы ЛПО, м; b — радиус внешней границы ЛПО, м; P — внешнее давление, Па; Δ_c — разница между максимальным и минимальным сцеплениями пород в ЛПО с неоднородным распределением температур, Па; Λ и $\bar{\Lambda}_{mean}$ — коэффициенты в линейном законе Кулона-Мора, записанном относительно максимального σ_1 и минимального σ_3 главных напряжений и некоторой средней температуры:

$$\sigma_1 = \Lambda \sigma_3 + \bar{\Lambda}_{mean}, \quad (4.5)$$

$$\Lambda = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{mean}}{2} \right), \quad \bar{\Lambda}_{mean} = 2c_{mean} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{mean}}{2} \right), \quad (4.6)$$

где c_{mean} — среднее по объему ЛПО сцепление пород, Па; φ_{mean} — средний по объему ЛПО угол внутреннего трения замороженных пород, не зависящий от температуры, °.

Помимо формулы (4.3) для оценки предельной внешней нагрузки на ЛПО также используется формула С.С. Вялова для случая конечной высоты незакрепленного породного массива, используемая в Инструкции по замораживанию пород на Дарасинском руднике:

$$E = \xi \frac{hP}{\sigma_c} \rightarrow P = \frac{\sigma_c E}{h\xi} = \frac{\sigma_c (b - a)}{h\xi}, \quad (4.7)$$

где σ_c — прочность замороженных пород на одноосное сжатие, Па; h — высота заходки, м; ξ — коэффициент, определяемый исходя из характера защемления верхнего и нижнего торца ЛПО.

По аналогии с (4.3) в настоящей работе введена также предельная несущая способность ЛПО P^* (Па) по условию предельного деформированного состояния (предельно допустимых перемещений внутренней стенки ЛПО до возведения крепи):

$$P^* = \frac{1}{h(1-\zeta)} \int_a^b A(r) \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \left(\frac{au_a}{rh} \right)^m dr. \quad (4.8)$$

Здесь $A(r)$ – модуль нелинейной деформации, МПа; m – показатель нелинейности зависимости напряжений от деформаций; α – показатель нелинейности по времени; h – высота заходки, м; u_a – предельно допустимые перемещения внутренней стенки ЛПО, м; $0 \leq \zeta < 1$ – параметр, характеризующий тип заземления торцов незакрепленного участка ЛПО.

Эта формула получена из классической формулы С.С. Вялова [128], путем выражения из нее величины нагрузки на внешнюю стенку ЛПО. Также дополнительно было принято, что модуль нелинейной деформации является функцией радиальной координаты r . Данная зависимость выражается опосредованно через температуру, которая является в основном функцией радиальной координаты. Исключением является малая зона в окрестности контура замораживающих колонок, где имеет место существенная зависимость температуры от окружной координаты φ .

Разработанный критерий вошел в Инструкцию по замораживанию пород на рудниках ОАО «Беларуськалий», а также составил основу предложенного автором способа оценки несущей способности ледопородного ограждения строящихся стволов шахт [47].

4.4 Анализ временной динамики предельной несущей способности ледопородного ограждения

Оценка предельной несущей способности ЛПО производилась при полях температуры, полученных из результатов теплофизического моделирования в разделе 4.1. Параметры a и b в различные моменты времени определялись исходя из рисунка 4.1 по пересечениям соответствующих температурных профилей с линией температуры замерзания воды. Прочностные свойства рассматриваемых слоев пород определялись из лабораторных испытаний образцов пород на прочность при различных температурах. Зависимости данных свойств от температуры были представлены ранее в таблице 4.2. При этом показатели нелинейности m и α принимались постоянными. Их значения для каждой породы также определялись в ходе лабораторных испытаний (см. таблицу 2.1). Для песка параметр m равнялся 0,47, для супеси – 0,43, для глины – 0,33. Показатель α

для песка составлял 0,14, для супеси – 0,11, а для глины – 0,16. Высота заходки принималась (с некоторым запасом) равной 5 м, а коэффициент ξ равен 1,73.

Полученные временные зависимости предельной несущей способности ЛПО по формулам (4.3) и (4.8) представлены на рисунке 4.6. На рисунке 4.6а представлены кривые, рассчитанные по формуле (4.3), а на рисунке 4.6б – по формуле (4.8).

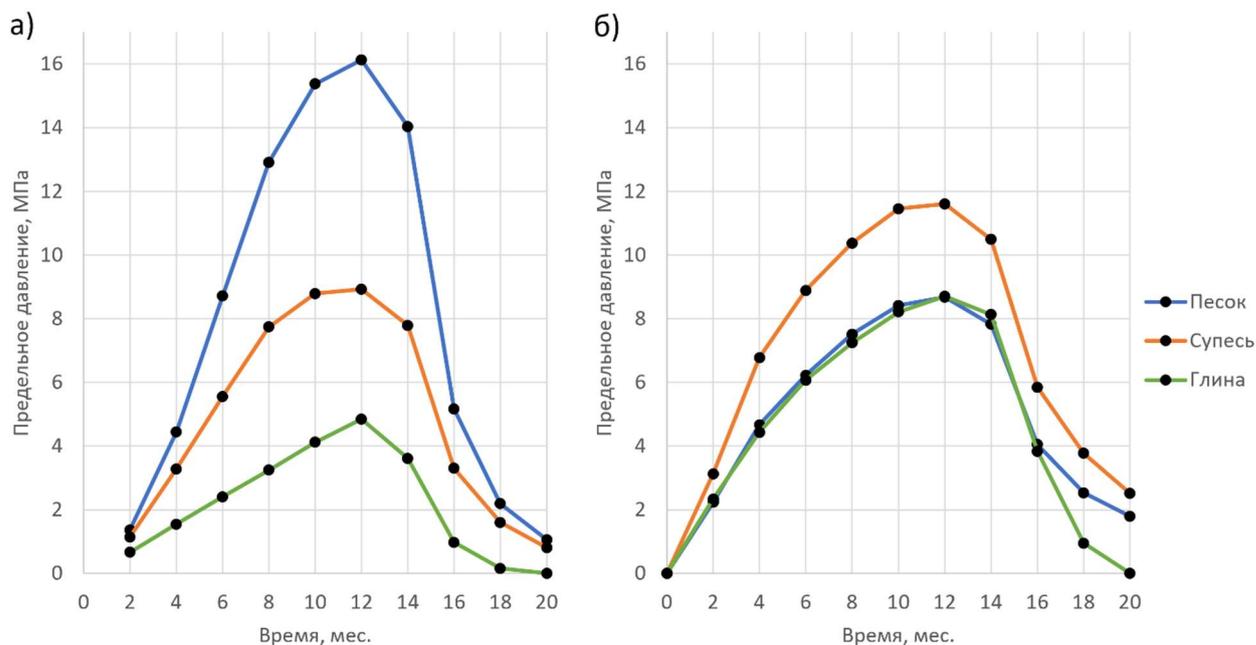


Рисунок 4.6 – Временные зависимости предельного давления, которое способно выдержать ЛПО, рассчитанного по формулам (4.3) и (4.8)

Из рисунка 4.6 видно, что в целом за 12 месяцев для всех рассмотренных слоев пород несущая способность ЛПО увеличивалась. При этом максимальные значения предельной внешней нагрузки по формулам были достаточно большими и через четыре месяца превышали фактическую внешнюю нагрузку, что связано с перемораживанием пород. Для песка внешняя нагрузка составила 0,17 МПа, для супеси – 1,36 МПа, для глины – 1,54 МПа. Эти величины рассчитывались как сумма двух составляющих: литостатического давления и давления столба воды на уровне подошвы каждого рассматриваемого слоя пород. Излишнее перемораживание пород было в основном связано с длительным поддержанием достаточно низких температур хладоносителя на стадии пассивного замораживания с целью обеспечения требуемых толщин ЛПО в слое песчаника в интервале глубин 133,7-141,5 м, где было выявлено фильтрационное течение подземных вод [115].

Пределные значения внешней нагрузки для песка по формуле (4.3) оказались намного ниже, чем по формуле (4.8). Для глины ситуация противоположная. Для супеси обе формулы дали сопоставимые величины для предельной внешней нагрузки. Эта

разница объясняется различными реологическими свойствами рассмотренных типов пород. При последующем анализе состояния ЛПО в каждом слое пород в расчет должна приниматься минимальная величина из рассчитанных по формулам (4.3) и (4.8). Таким образом, оценка состояния ЛПО на всём временном промежутке его существования может быть сделана в рамках единственного и однозначного критерия – предельной несущей способности ЛПО.

Примечательно, что уменьшение предельной несущей способности ЛПО впервые наблюдается в момент времени 14 месяцев. При этом представленная на рисунке 4.2б толщина ЛПО для слоев песка и супеси начинает существенным образом меняться намного позднее, в момент времени 18 месяцев. Существенное снижение температуры хладоносителя, начинающееся на 14-й месяц с момента начала замораживания, не сразу оказывает эффект на положение изотермы начала замерзания поровой воды. Как отмечалось ранее в разделе 4.1 такой инерционный эффект связан с конечной скоростью передачи теплоты через породный массив между замораживающими колонками и границами ЛПО.

4.5 Выводы по главе

1. Проведено численное моделирование искусственного замораживания пород для условий породного массива вокруг скипового ствола Дарасинского рудника. Рассматривались слой песка в интервале глубин 2,1-18 м, слой супеси в интервале глубин 82,9-97,3 м и слой глины в интервале глубин 141,5-154,8 м. Моделирование проводилось для стадий активного замораживания, пассивного замораживания и размораживания.
2. По полученным результатам моделирования были построены временные зависимости средней температуры и толщины ЛПО для каждого слоя породы. В ходе анализа данных зависимостей установлено, что толщина ЛПО у песка и глины одинаковы в моменты времени 4 и 20 месяцев после начала замораживания. При этом прочность замороженных пород спустя 4 месяца гораздо выше, чем спустя 20 месяцев, на что указало распределение средней температуры ЛПО и эмпирические зависимости прочностных свойств пород от температуры. Это указывает на неоднозначность критерия толщины ЛПО при оценке его несущей способности.
3. Исследованы варианты управления средней температурой и толщиной ЛПО в фазе пассивного замораживания с целью поддержания проектных параметров

ЛПО. Для этого было проведено дополнительное моделирование искусственного замораживания слоя глины скипового ствола Дарасинского рудника при управлении средней температурой или толщиной ЛПО в период пассивного замораживания. По результатам моделирования установлено, что возможно управление и поддержание средней температурой ЛПО на проектных значениях. При этом управлять и поддерживать на проектных значениях толщину ЛПО невозможно, т.к. независимо от того, каким параметром управлять, толщина ЛПО продолжает расти в силу значительной инерционности процесса теплопереноса между замораживающими колонками и границами ЛПО.

4. С учетом показанной неоднозначности определения несущей способности ЛПО по критериям толщины и средней температуры ЛПО предложен и обоснован новый критерий количественной оценки несущей способности ЛПО. Идея нового критерия заключается в вычислении напрямую предельной несущей способности ЛПО в каждый заданный момент времени. Рассчитывать предельную несущую способность ЛПО предлагается по критерию прочности исходя из модифицированной формулы С.С. Вялова для расчета толщины ЛПО в неоднородном поле температур и формулы С.С. Вялова для случая конечной высоты незакрепленного породного массива, используемой в Инструкции по замораживанию пород на Дарасинском руднике. Итоговая величина предельной несущей способности ЛПО определяется как минимальная величина из данных результатов двух формул.
5. По предложенному критерию была проведена оценка состояния ЛПО на всём временном промежутке его существования для случая скипового ствола Дарасинского рудника. Получено, что максимальное значение внешней нагрузки через четыре месяца превышало фактическую внешнюю нагрузку, что связано с перемораживанием пород на стадии пассивного замораживания с целью обеспечения требуемых толщин ЛПО в слое песчаника в интервале глубин 133,7-141,5 м, где было выявлено фильтрационное течение подземных вод.

5 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИКОЙ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТВОЛОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

5.1 Общая концепция и критерии управления режимом замораживания горных пород

Предлагаемая нами концепция управления искусственным замораживанием (или «замораживание по требованию») подразумевает оперативное изменение режима работы замораживающего комплекса в соответствии с поставленной задачей.

Концепция по требованию = $\left[\begin{array}{c} \text{СКОЛЬКО} \\ \text{КОГДА} \\ \text{КУДА} \end{array} \right]$ нужно подавать «холода»

В целом, управление режимом замораживания производится на всех этапах процесса искусственного замораживания/размораживания. Напомним, что это этапы:

- (1) активного замораживания или формирования ЛПО,
- (2) пассивного замораживания или поддержания ЛПО и
- (3) размораживания ЛПО, которое может быть активным, с нагревом и циркуляцией теплоносителя в рассольной сети, и пассивным (естественным), без нагрева, но с сохранением циркуляции теплоносителя или без нее.

Новая концепция управления замораживанием базируется на трех основных пунктах [2]:

- мониторинг основных параметров породного массива и системы замораживания;
- дистанционное управление системой замораживания;
- оперативное реагирование на возможные непредвиденные события.

Ее основная идея заключается в нахождении наиболее рационального решения по совокупности двух критериев:

- (1) уменьшения издержек на искусственное замораживание при одновременном
- (2) сохранения, а иногда, и повышения безопасности ведения горных работ.

Уменьшение издержек обычно выражается в снижении энергопотребления как основного фактора затрат, а безопасность ведения горных работ – в сохранении требуемых эксплуатационных характеристик ЛПО при проходке ствола. По сути, решается задача оптимизации процесса замораживания с тем лишь исключением, что на практике невозможно добиться оптимального (идеального по удовлетворению критериям) состояния, и по сути реализуется только наиболее рациональное решение из всех возможных.

Важно отметить, что управление замораживанием имеет две составляющие: **стратегическую** и **тактическую**. Первая подразумевает определение наиболее рационального режима работы замораживающего комплекса на том или ином этапе искусственного замораживания и на весь период проведения работ в целом. Вторая — оперативные корректировки текущего режима в ответ на фактическое развитие ситуации (см. рисунок 5.1).

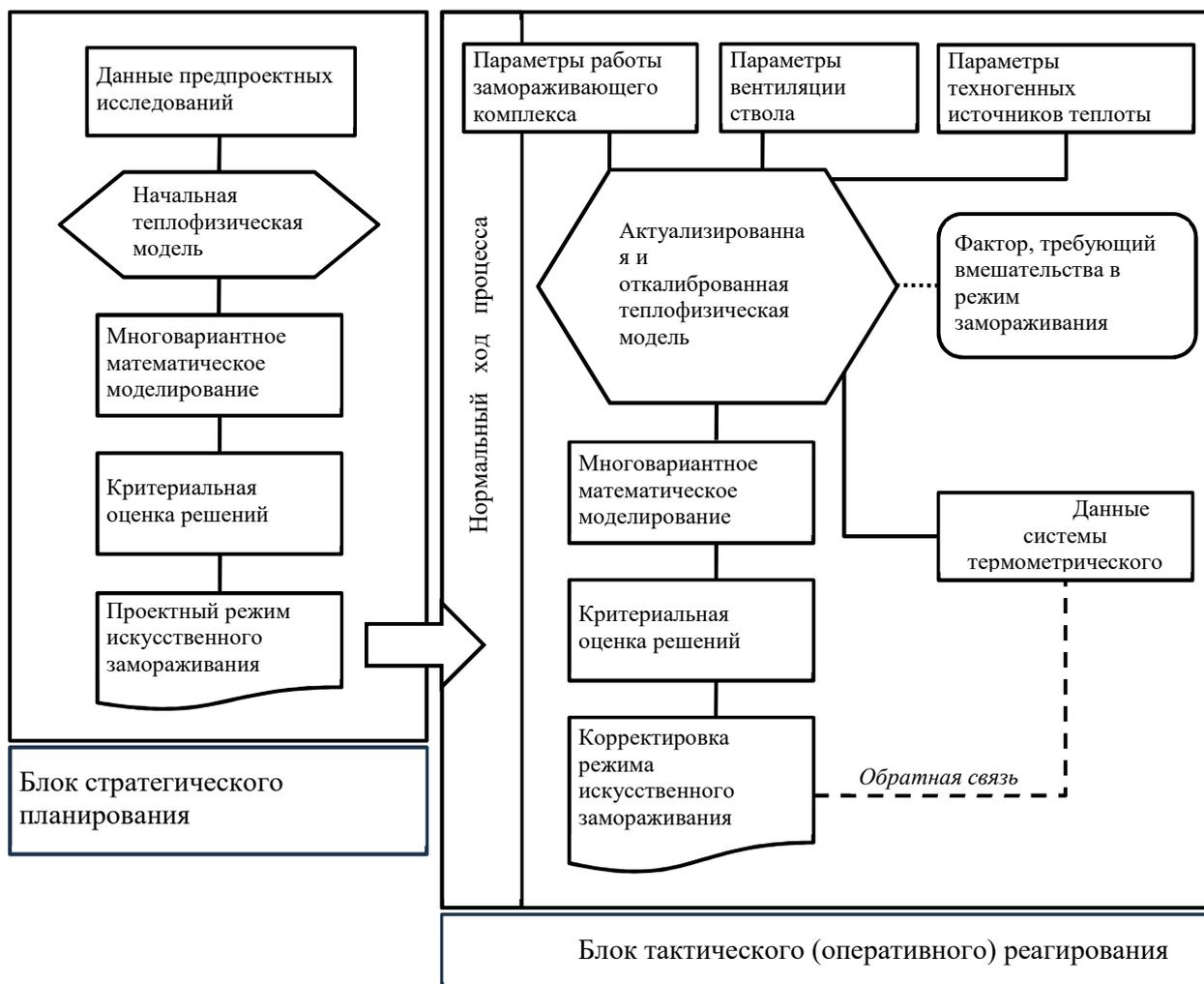


Рисунок 5.1 – Концепция управления замораживанием в виде блок-схемы

Для стратегического планирования используются результаты многовариантного математического моделирования на начальной теплофизической модели, разработанной и параметризованной по данным, полученным на этапе предпроектных исследований: данные бурения разведочных, контрольно-стволовых и гидрогеологических скважин, геофизических исследований в них, лабораторных испытаний образцов керна горных пород, иной геолого-геофизической информации. Начальная модель может характеризоваться высокой степенью детальности, а моделирование на ее основе –

давать в достаточной мере достоверный результат для прогнозирования и проектирования работ в целом.

Однако процесс замораживания является нестационарным и длительным и зависит от множества факторов, детально учесть влияние которых на начальном этапе не представляется возможным, тем более в отсутствие «проверки» обратной связью, т.е. регулярными замерами температуры горных пород непосредственно в процессе замораживания. Поэтому оперативные или тактические решения по оптимизации режима работы замораживающего комплекса разрабатываются непосредственно в процессе строительных работ. Основой для разработки решений служит прогнозное многовариантное математическое моделирование, выполняемое с использованием актуализированной теплофизической модели, откалиброванной по показаниям оптоволоконной термометрической системы.

На рисунке 5.1 выделены блоки стратегического планирования и тактического (оперативного) реагирования. Результатом работы блока стратегического планирования является проектный режим работы замораживающего комплекса, обеспечивающий нормальный ход процесса искусственного замораживания. При обнаружении фактора, требующего вмешательства в режим замораживания, производится задействование блока тактического реагирования для разработки корректирующих технических решений. Выбор наиболее рационального решения производится на основании критериальной оценки, описанной выше. Обратную связь обеспечивает оптоволоконная система термометрического контроля, отражающая температурный отклик породного массива в ответ на применение корректирующих мероприятий, позволяющая оценить достаточность вмешательства в процесс.

5.2 Управление замораживанием при формировании ледопородного ограждения

Традиционно считается, что управление искусственным замораживанием начинается с перехода на этап поддержания ЛПО с целью недопущения непродуктивных затрат электроэнергии. Какое-либо регулирование на этапе активного замораживания обычно не предусматривается. Замораживающий комплекс запускается на полную мощность для гарантированного формирования ЛПО требуемой толщины и температуры в расчетные сроки, обеспечивающие своевременное начало работ по проходке ствола. Фактически при этом на практике происходит значительное перемораживание породы внутри и вне контура проходки ствола при закономерно непродуктивном расходовании электроэнергии, затраченной на перемораживание.

Следующие формулы позволяют выполнить расчет средней холодопроизводительности замораживающей станции \bar{W} и суммарной теплопоглощающей способности замораживающих колонок $W_{3к}$ [11, 24]:

$$\bar{W} = \frac{0,0116 \cdot Q}{t}, \quad (5.1)$$

$$W_{3к} = \frac{Sk}{860}, \quad (5.2)$$

где Q – суммарное количество теплоты, которое требуется отвести из массива для формирования ЛПО с проектными параметрами, Дж; t – время, отведенное для формирования ЛПО, с; $S = \pi dhn$ – суммарная площадь внешней поверхности замораживающих колонок, м²; d, h – внешний диаметр трубы замораживающей колонки и ее длина, м; n – количество замораживающих колонок в контуре; k – коэффициент теплопроводности замораживающей колонки.

При этом второе значение показывает лишь величину холодопроизводительности при максимальном задействовании суммарной теплопоглощающей способности замораживающих колонок, но не необходимую для оптимального режима. Другими словами, это пропускная способность самих колонок.

Средняя же величина не позволяет определить пиковую (максимальную) нагрузку, которая определяет максимальное количество задействованных блоков холодильного оборудования в период активного формирования ЛПО. Данная величина зависит не только от естественной температуры породного массива, являющейся начальной при замораживании, но и от выбранного режима понижения температуры рассола, который, в свою очередь, не может быть выбран произвольно.

Рассмотрим уравнение теплового баланса системы «замораживающие колонки – породный массив»:

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} = \frac{\partial H_2}{\partial t} + \frac{\partial H_3}{\partial t} + L \frac{\partial w}{\partial t}, \quad (5.3)$$

где $\frac{\partial H_1}{\partial t}, \frac{\partial H_2}{\partial t}, \frac{\partial H_3}{\partial t}$ – изменение энтальпии (теплосодержания) хладоносителя при движении вдоль внешней трубы замораживающей колонки, замороженной и незамороженной зон породного массива соответственно, Вт; L – удельная теплота фазового перехода воды в лед, Дж/кг; $\frac{\partial w}{\partial t}$ – весовое количество воды, превратившейся в лед в порах породы, кг; при этом

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} = \frac{cm\Delta T}{\partial t}, \quad (5.4)$$

где m – массовый расход хладоносителя в замораживающей колонке, кг/с; c – удельная теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·°С); ΔT – мгновенная разница температур прямого и обратного потоков хладоносителя, °С; t – переменная времени, с.

В соответствии с (5.4) холодильная мощность замораживающей станции определяет допустимую разницу температур прямого и обратного потоков хладоносителя, которую она может скомпенсировать. При достижении данной величины замораживающая станция просто не способна будет продолжить понижение температуры прямого потока хладоносителя, пока ΔT вновь не станет менее предельного значения.

Из результатов практических расчетов и работы [52] ясно, что при монотонном характере понижения температуры хладоносителя в замораживающих колонках на 1-2°С холодильное оборудование в составе замораживающей станции испытывает пиковые нагрузки в период от 15 до 30 суток. В это время разница температур ΔT прямого и обратного потоков хладоносителя принимает наибольшее значение.

Обусловлено это значительной величиной энергозатрат на охлаждение прилегающего к колонкам массива и малой площадью внешней поверхности сформированных ледопородных цилиндров до их смыкания в единое ЛПО и некоторое время после. При увеличении внешней поверхности ЛПО удельная величина земных теплопритоков к его границе снижается, как, впрочем, и скорость внешней экспансии границы мерзлой породы. Снижается величина градиента температур хладоносителя и массива в непосредственном окружении замораживающих колонок, определяющая величину теплового потока через стенку колонки. Соответственно уменьшается доля непродуктивных энергозатрат, выраженных в слагаемом $\frac{\partial H_3}{\partial t}$ уравнения (5.3), т. е. направленных на охлаждение массива за пределами ЛПО.

В целом практические наблюдения показывают, что при снижении температуры хладоносителя с начального значения до рабочего (температура активного замораживания) с шагом -1°С/сутки отношение пиковой холодопроизводительности к ее среднему значению равно $W_{max}/\bar{W} \leq 2,0$.

После того как температура хладоносителя в замораживающих колонках достигает требуемого значения на этапе активного замораживания, в дальнейшем осуществляется лишь ее поддержание. Разница температур прямого и обратного потоков постепенно уменьшается, а значит уменьшается и расходуемая холодильная мощность замораживающей станции. В этом время становится возможным регулирование работы

замораживающего комплекса путем отключения лишних блоков холодильного оборудования, и более эффективного распределения нагрузки на оставшиеся в работе.

Покажем данный механизм управления на практическом примере участка строительства клетового ствола Дарасинского рудника (рисунок 5.2). В начальный период замораживания для скорейшего понижения температуры хладоносителя в работу последовательно включались 2, 3 и затем 4 блока холодильного оборудования номинальной мощностью 300 кВт. В процессе искусственного замораживания было выполнено моделирование в программно-аналитическом комплексе «FrozenWall». С использованием расчетного модуля «С/Н Power», на основе среднесуточной суммарной мощности замораживающих колонок, была определена величина среднесуточной холодопроизводительности замораживающей станции и сопоставлена со значениями, рассчитанными по фактическим показаниям термометров, измеряющих температуру прямого и обратного потоков хладоносителя, и расходомера. Несовпадение расчетных и фактических значений в начальный период набора холодильной мощности связано с различными процессами наладки работы измерительного оборудования.

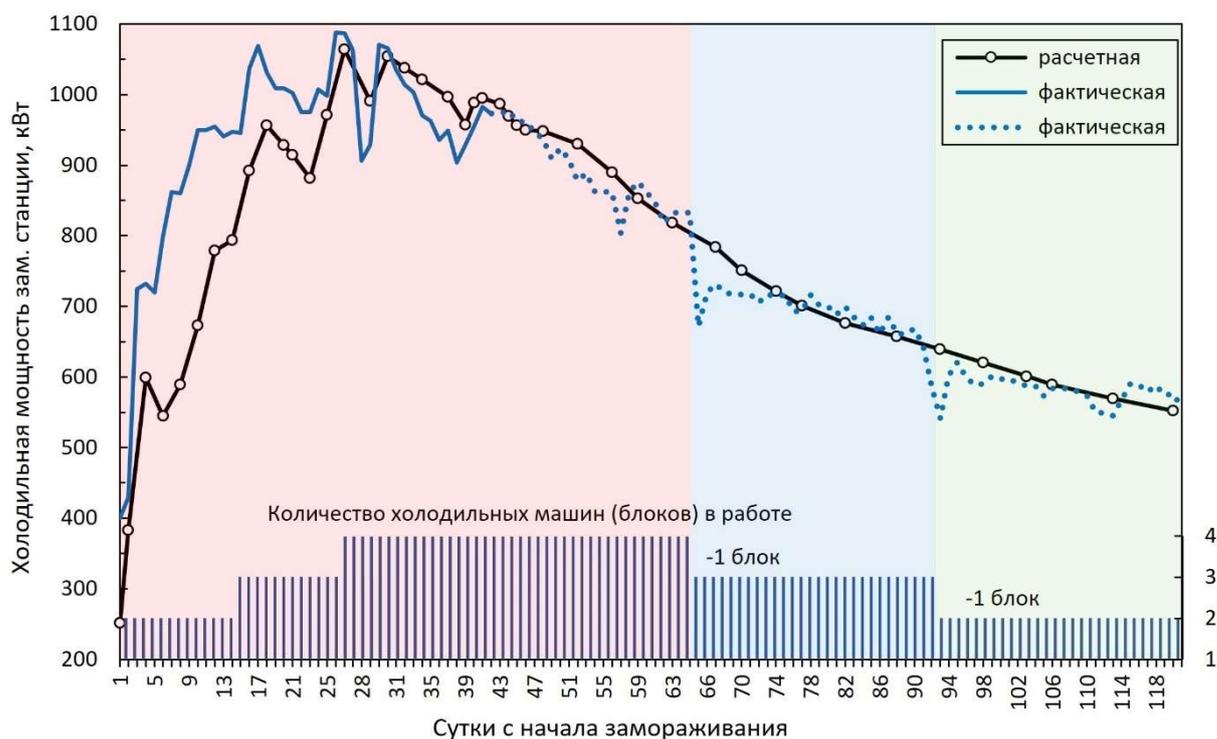


Рисунок 5.2 – Поэтапный вывод из работы блоков холодильного оборудования на этапе активного замораживания при одновременном поддержании рабочей температуры прямого потока и расхода хладоносителя в замораживающих колонках

По результатам прогнозного моделирования был определен график поэтапного вывода из работы блоков холодильного оборудования в составе замораживающей

станции таким образом, чтобы на протяжении расчетного периода сохранялись требуемая температура прямого потока и расход хладоносителя в замораживающих колонках. Последующее применение данного режима доказало состоятельность расчетов, о чем говорит удовлетворительное совпадение кривых расчетной (черная сплошная) и фактической (синяя точечная) холодильной мощности замораживающей станции на рисунке 5.2. Аналогичные расчеты производились для участка строительства скипового ствола, что позволило оптимизировать работу всего замораживающего комплекса в целом.

Особый интерес представляет управление замораживанием с поинтервальным разрешением на проходку ствола. Ранее считалось, что проходка шахтного ствола может начинаться только после достижения требуемых параметров ЛПО во всем интервале замораживания. Фактически же ожидание медленно промерзающих слоев в нижней и средней частях разреза, с большим количеством физически связанной воды и низкой температуропроводностью, приводило к тому, что в верхних слоях разреза, обладающих высокой температуропроводностью, порода оказывалась переморожена относительно требуемых размеров ЛПО. Тем более, что в верхней части разреза требуемые толщины ЛПО, определенные на основании статического расчета, имеют небольшие значения, поскольку невелика внешняя нагрузка.

Рассмотрим два возможных варианта развития ситуации, представленные на рисунке 5.3, и их технико-экономические последствия. Ситуация, представленная на рисунке 5.3а соответствует случаю, когда необходимая толщина ЛПО в интервале строительства технологического отхода уже достигнута. Однако границы мерзлой породы еще не достигли контура ствола в проходке. Поскольку замораживаемый слой в этой части разреза обычно сложен рыхлыми (несцементированными) обводненными породами, начало проходки в данный момент приведет к чрезмерному обрушению стенок ствола вплоть до внутренней границы ЛПО, самопроизвольному расширению контура проходки ствола и перерасходу бетона и прочих материалов для заполнения обрушившегося пространства и формирования крепи большей толщины, обеспечивающей проектный радиус ствола в свету.

Предположим, что начало проходки привязано к достижению требуемой толщины ЛПО во всем интервале замораживания горных пород. Тогда, как показано на рисунке 5.3б, за время, отведенное для промораживания нижних слоев разреза, в интервале строительства технологического отхода граница мерзлой породы существенно продвинется внутрь контура проходки ствола. Это приведет к

необходимости пересмотра паспорта буровзрывных работ и замедлению темпов проходки с самого ее начала.

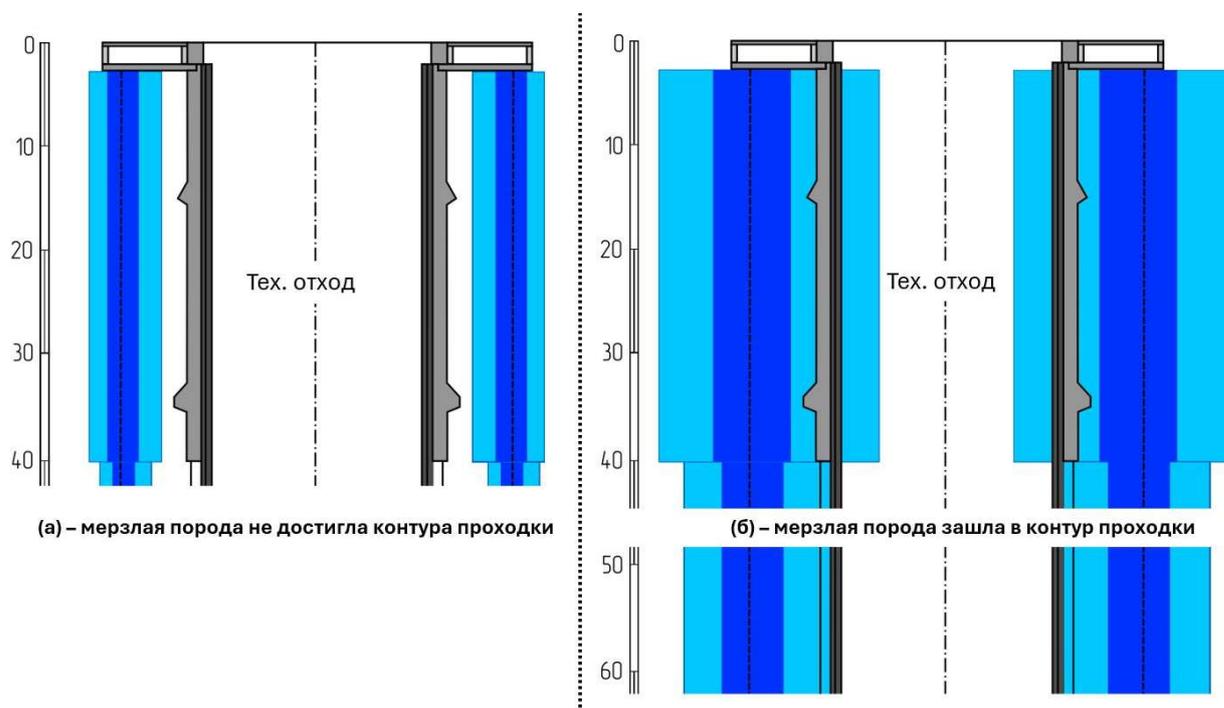


Рисунок 5.3 – К обоснованию необходимости поинтервального разрешения на проходку в совокупности с управлением замораживанием по требованию

Наиболее рациональным вариантом является поинтервальная выдача разрешений на проходку, требующая гибкого управления замораживанием, соотнесенного с темпами проходки ствола. Так, в момент приближения границы мерзлой породы к контуру проходки ствола в интервале технологического отхода с учетом проектных сроков его строительства дается разрешение на начало проходки данного интервала глубин. Основным ориентиром для управления режимом замораживания становятся слои, лежащие ниже интервала технологического отхода. После завершения строительства технологического отхода, монтажа проходческого оборудования выдается разрешение на проходку следующего интервала, например, следующих 40-50 м, в котором к этому времени за счет управления замораживанием требуемые толщины ЛПО уже будут достигнуты.

Пример поинтервальной проходки скипового ствола Дарасинского рудника показан на рисунке 5.4.

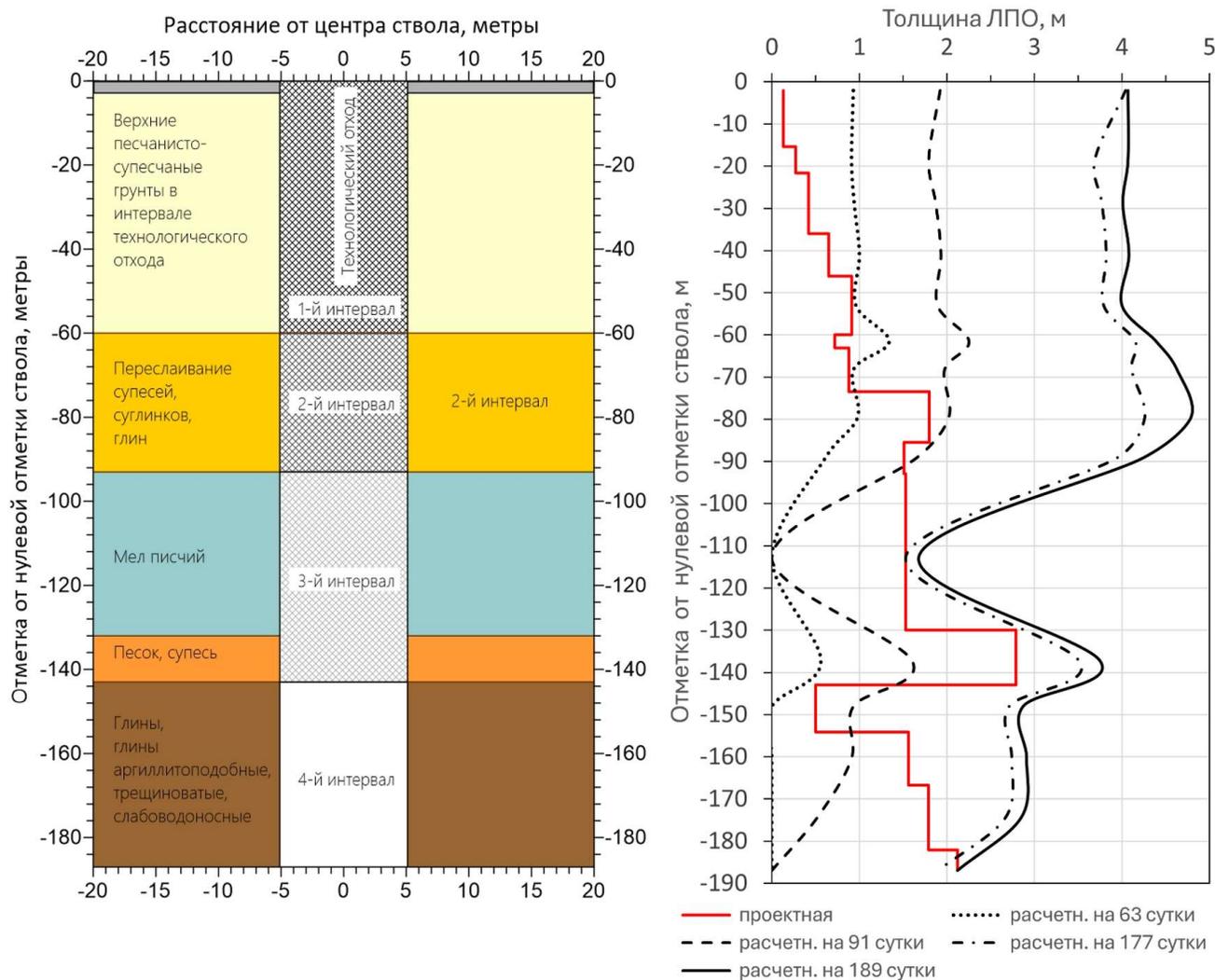


Рисунок 5.4 – Пример поинтервальной проходки скипового ствола Дарасинского рудника (слева), распределение проектной и фактической толщин ЛПО с глубиной в процессе замораживания (справа)

Справа проиллюстрирован псевдоразрез модельного распределения температур в замораживаемом массиве пород с нанесенными границами шахтного ствола, пройденного в интервале технологического отхода. Начинается проходка следующего интервала глубин 50-100 м, в котором ЛПО требуемых размеров уже сформировано. В то же время продолжается активное формирование ЛПО в нижней части разреза. В левой части рисунка показана укрупненная литологическая колонка для участков строительства шахтных стволов №1 и №2 Дарасинского рудника с элементами крепи, замораживающими колонками и расположением датчиков системы термометрического контроля.

Поинтервальный подход позволяет сократить сроки начала проходки примерно с 4 до 2,5 месяцев и избежать проблем, вызванных перемораживанием породы в контуре проходки ствола. Это в свою очередь позволяет максимально выдержать проектный план-график выполнения работ, не допуская срыва сроков производства различных этапов. При таком подходе граница между активным и пассивным замораживанием в их классическом понимании оказывается размытой, поскольку проходка ствола ведется одновременно с активным формированием ЛПО в нижележащих слоях.

5.3 Оптимизация работы замораживающей станции на этапе поддержания ледопородного ограждения

В какой-то момент времени может оказаться так, что требуемые толщины ЛПО уже достигнуты во всем интервале замораживания, а темпы проходки не успевают за темпами промерзания пород. Данная ситуация возникает на практике, поскольку существенное замедление темпов роста ЛПО возможно только при высоких отрицательных температурах хладоносителя, чего невозможно добиться, так как средняя температура ЛПО будет чрезмерно высокой, а это нарушает второй критерий его прочности и устойчивости к деформациям, действующий наряду с требуемой толщиной.

В теории, с позиции стратегического планирования, алгоритм управления искусственным замораживанием на этапе поддержания ЛПО сводится к выбору графика повышения температуры хладоносителя, обеспечивающего ее максимально возможное значение в каждый момент времени при сохранении требуемой несущей способности ЛПО без дополнительного увеличения его внешних размеров.

На практике невозможно выдержать идеальные условия задачи оптимизации режима замораживания, но возможно выбрать такой, весьма рациональный, режим, который будет наиболее приближен к оптимальному.

Пусть критериями прочного ЛПО являются его толщина по границам мерзлой породы (по температуре начала замерзания воды в породе) и средняя температура.

Предположим, что оба этих значения достигнуты в процессе формирования ЛПО и дан сигнал к началу проходки ствола. Задача дальнейшей оптимизации режима замораживания требует подобрать такой график повышения температуры хладоносителя, который сохранит оба критерия на достигнутом значении, т. е. позволит плавно повышать температуру прямого потока хладоносителя, повышая таким образом среднюю температуру ЛПО, но одновременно не увеличивая его толщину по границам мерзлой породы. Данное требование невыполнимо, поскольку ЛПО продолжает расширяться вовне от контура замораживающих колонок, а повышение температуры хладоносителя при той же толщине ЛПО неизбежно приведет к повышению средней температуры выше требуемого значения.

В общем, два критерия, температура и толщина, весьма плохо увязываются между собой в системе управления замораживанием, что было показано ранее в главе 4. Более гибким является критерий несущей способности, определяющийся через температуру и размеры ЛПО. При управлении замораживанием имеет смысл ориентироваться на величину относительной несущей способности:

$$P_0 = \frac{P_c}{P_r}, \quad (5.5)$$

где P_c, P_r – текущая расчетная и минимально требуемая величины несущей способности ЛПО соответственно, Па. При (а) $P_0 = 1$ условия достаточной прочности и сопротивления деформации соблюдены, ЛПО соответствует всем требованиям геомеханического расчета; при (б) $P_0 < 1$ ЛПО условно «недоморожено», недостаточна его толщина и/или повышена средняя температура, значит его несущая способность ниже требуемой; при (в) $P_0 > 1$ ЛПО «переморожено» и его несущая способность выше требуемой. Если случаи (а) и (б) наблюдаются в период пассивного замораживания, ситуация требует корректировки режима работы замораживающей станции. В случае (а) увеличения холодильной мощности для скорейшего достижения или восстановления требуемой несущей способности ЛПО, в случае (б) — ее снижения во избежание непродуктивных энергозатрат. Единственной сложностью применения данного подхода является то, что для расчета несущей способности необходимы детальные сведения о геомеханических характеристиках мерзлых горных пород в интервале замораживания при различных отрицательных температурах, полностью характеризующие поведение породы под нагрузкой с учетом неравномерного распределения температур внутри ЛПО.

Следующей причиной, препятствующей идеальному выполнению задачи оптимизации, является вертикальная зональность теплофизических и физико-механических свойств породного массива. Разные горные породы обладают различными

теплофизическими свойствами, плотностью и влагосодержанием. Переслаивание пород в разрезе изначально создает предпосылки для развития ЛПО в разных слоях с разной скоростью. Поэтому концепция замораживания по требованию имеет важный аспект – она рассматривает интервал замораживания не как единое однородное целое, а как совокупность отдельных слоев пород, каждый из которых требует отведения различного количества теплоты для достижения требуемой толщины ЛПО, и притом – с различной скоростью процесса [15, 17].

В ответ на изменение режима работы замораживающей станции возникает реакция – отклик среды, выражающийся в изменении температур и скорости продвижения границы фазового перехода. Математическое моделирование позволяет понять скорость и величину этой реакции в каждом слое разреза в интервале замораживания горных пород, выделить опорный слой, наиболее интенсивно реагирующий на корректировку и в дальнейшем выбрать такой график повышения температуры хладоносителя, который не приведет к снижению несущей способности ЛПО в данном слое в течение всего периода пассивного замораживания. В остальных слоях величина относительной несущей способности неизбежно будет более 1, но такой подход гарантирует снижение непродуктивных энергозатрат до минимально возможного уровня при одновременном сохранении безопасности ведения горных работ во всем интервале искусственного замораживания.

Пример графика повышения температуры хладоносителя, полученный на основании моделирования поведения слоев геологического разреза участка строительства шахтных стволов Петриковского ГОК ОАО «Беларуськалий», представлен на рисунке 5.5. Графики представлены для двух вариантов температуры прямого потока хладоносителя на этапе активного замораживания. Вид графиков – ступенчатая функция – определяется наиболее удобным шагом изменения температуры в 1°C исходя из технических возможностей оборудования. В качестве опорного служил слой мела писчего, имеющий наименьшую толщину на момент завершения этапа активного замораживания, но при этом обладающий достаточно высокой теплопроводностью, обуславливающей высокую скорость реакции на изменение режима работы замораживающего комплекса, а именно – высокую скорость повышения средней температуры.

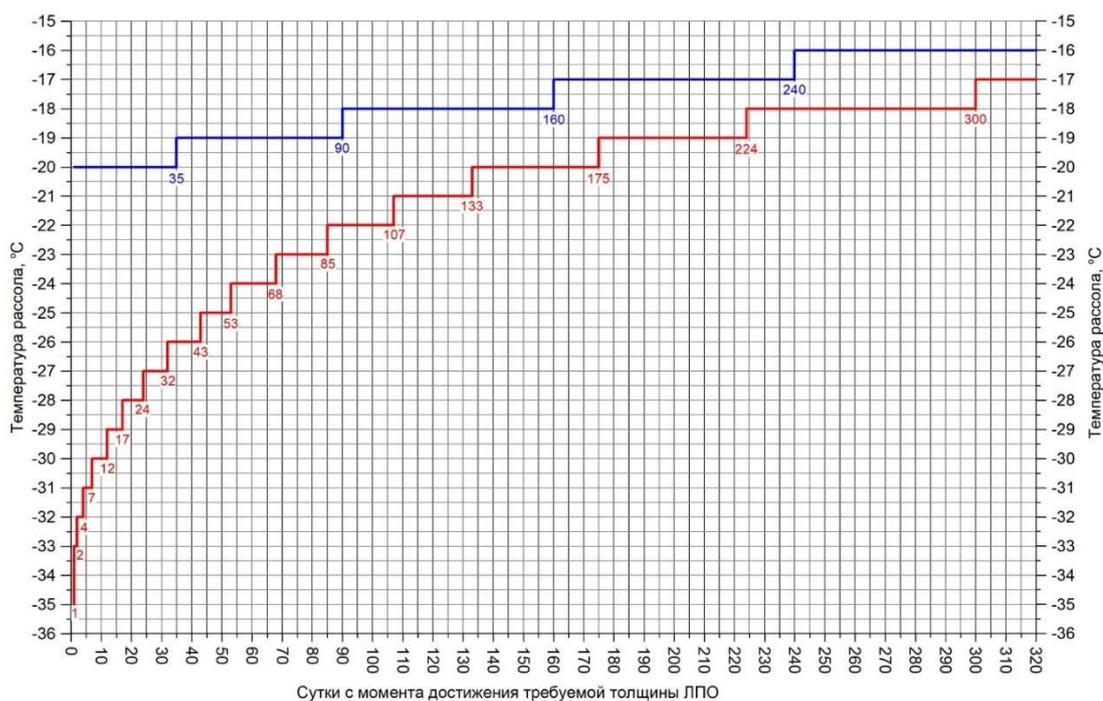


Рисунок 5.5 – Графики повышения температуры хладоносителя (рассола CaCl_2) в период поддержания ЛПО в виде ступенчатой функции при температуре хладоносителя на этапе активного замораживания -20°C (синий) и -35°C (красный)

Аналогичный график, но уже в виде гладкой функции, был рассчитан для условий строительства скипового и клетового стволов Дарасинского рудника ОАО «Беларуськалий» на стадии разработки основных технических решений для проекта на искусственное замораживание горных пород (рисунок 5.6).

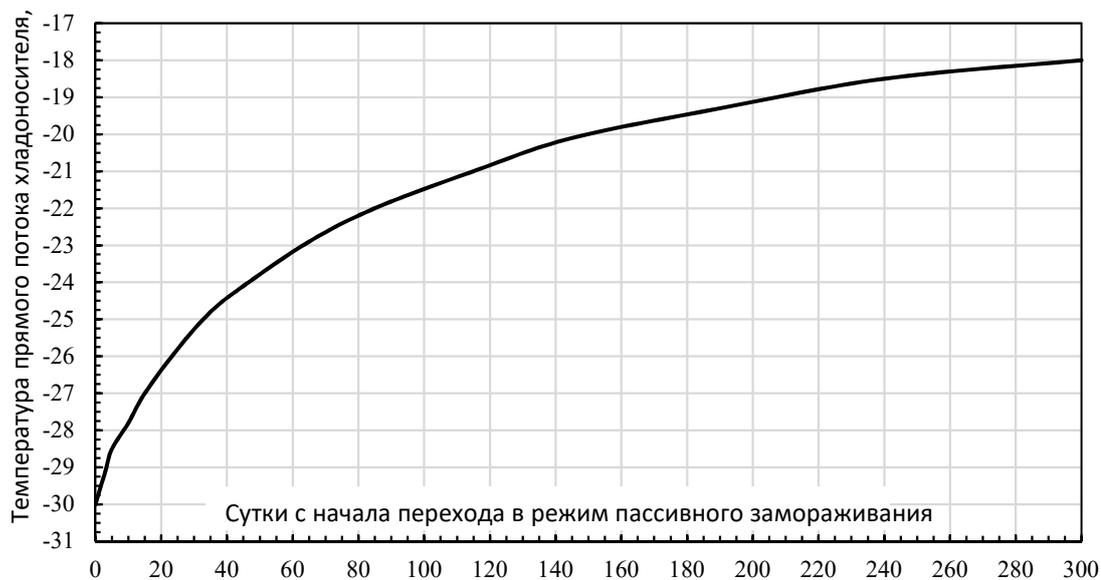


Рисунок 5.6 – График повышения температуры хладоносителя (рассола CaCl_2) в период поддержания ЛПО при рабочей температуре хладоносителя на этапе активного замораживания -30°C

Оба примера демонстрируют результаты работы блока стратегического планирования в предложенной концепции управления замораживанием.

Работу блока тактического реагирования на возникновение внештатной ситуации продемонстрируем на примере участка строительства скипового ствола Дарасинского рудника. Как было показано ранее в разделе 2, геологические разрезы на участках строительства клетового и скипового шахтных стволов Дарасинского рудника значительно отличались до глубины около 145 м. Скиповой ствол оказался заложен в пределах палеодолины, заполненной нестратифицированными терригенными отложениями. Осложняло ситуацию наличие вблизи ложа палеодолины большого количества крупной гальки, глыб мела писчего и крупных углефицированных остатков деревьев.

В начальный период наблюдений за состоянием замораживаемого массива была обнаружена температурная аномалия, которая не объяснялась нормальным развитием процессов теплопереноса в системе «замораживающие колонки – породный массив». Попытки откалибровать модель не привели к успеху — не удавалось достичь удовлетворительного согласования вычисленных и измеренных температур во всех КТ скважинах (хотя бы в пределах погрешности $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$). Согласование температур становилось возможным только в нарушение физичности в распределении теплофизических характеристик породы.

Стало очевидно, что процесс теплопереноса осложнен массопереносом вследствие движения флюида (жидкой фазы) в порово-трещинном пространстве пород. Были выдвинуты две гипотезы, одна из которых не подтвердилась — утечка хладоносителя из разгерметизированной замораживающей колонки с северо-западной стороны, в секторе колонок 10-18, в направлении между скважинами КТ2 и ГН1 (рисунок 5.7). Рассольная сеть успешно прошла проверку на герметичность.

Вторая гипотеза заключалась в направленном постоянном движении подземных вод в данном слое, который по результатам предпроектных исследований был классифицирован как водоносный, подстилаемый относительным водоупором. Последующие наблюдения за температурами массива в контрольно-термических скважинах подтвердили правомерность данной гипотезы.

В итоге в математические алгоритмы программно-аналитического комплекса «FrozenWall» были внесены соответствующие изменения, которые учитывали направленный тепломассоперенос. Векторным параметром в модели, определяющим направление и интенсивность этого процесса, служила скорость фильтрации потока (скорость Дарси).

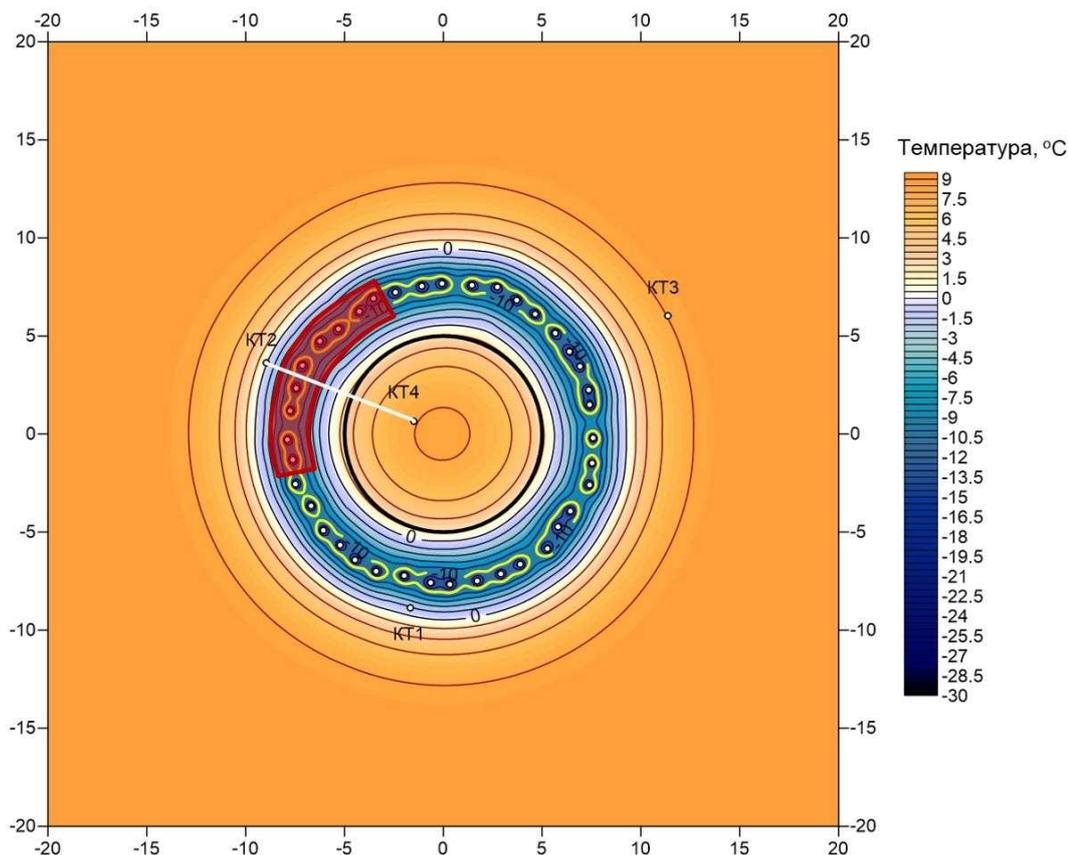


Рисунок 5.7 – Расположение КТ скважин в слое 11 – песчаник с включениями гальки и модельное распределение температур на 15.01.2021. Глубины кровли – 133,7 м, подошвы 141,5 м от нулевой отметки. Скважины КТ2 и ГН1 соединены белой линией. Красной заливкой отмечен сектор колонок №10-18 как наиболее вероятное место утечки

Последующая калибровка теплофизической модели с учетом фильтрации подземных вод позволила согласовать измеренные и вычисленные значения температур в данном слое с погрешностью, не превышающей $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, чего не удавалось добиться ранее. Модельные распределения температур без учета влияния фильтрации подземных вод и с учетом данного фактора представлены на рисунке 5.8. В последнем случае в распределении температур отчетливо проявляется осевая асимметрия относительно воображаемой вертикальной оси, проведенной через центр ствола.

В процессе термометрического контроля было обнаружено, что в результате фильтрации подземных вод с восточной стороны ЛПО не успевает набрать требуемую толщину при заданной температуре прочной породы к расчетному сроку окончания периода активного замораживания. Активное замораживание было продолжено, чтобы при продвижении забоя ствола к верхней отметке данного осложненного интервала разреза не возникло оснований для остановки проходческих работ. В данном случае во главу угла ставился фактор обеспечения непрерывности и безопасности работ, а не экономия энергозатрат.

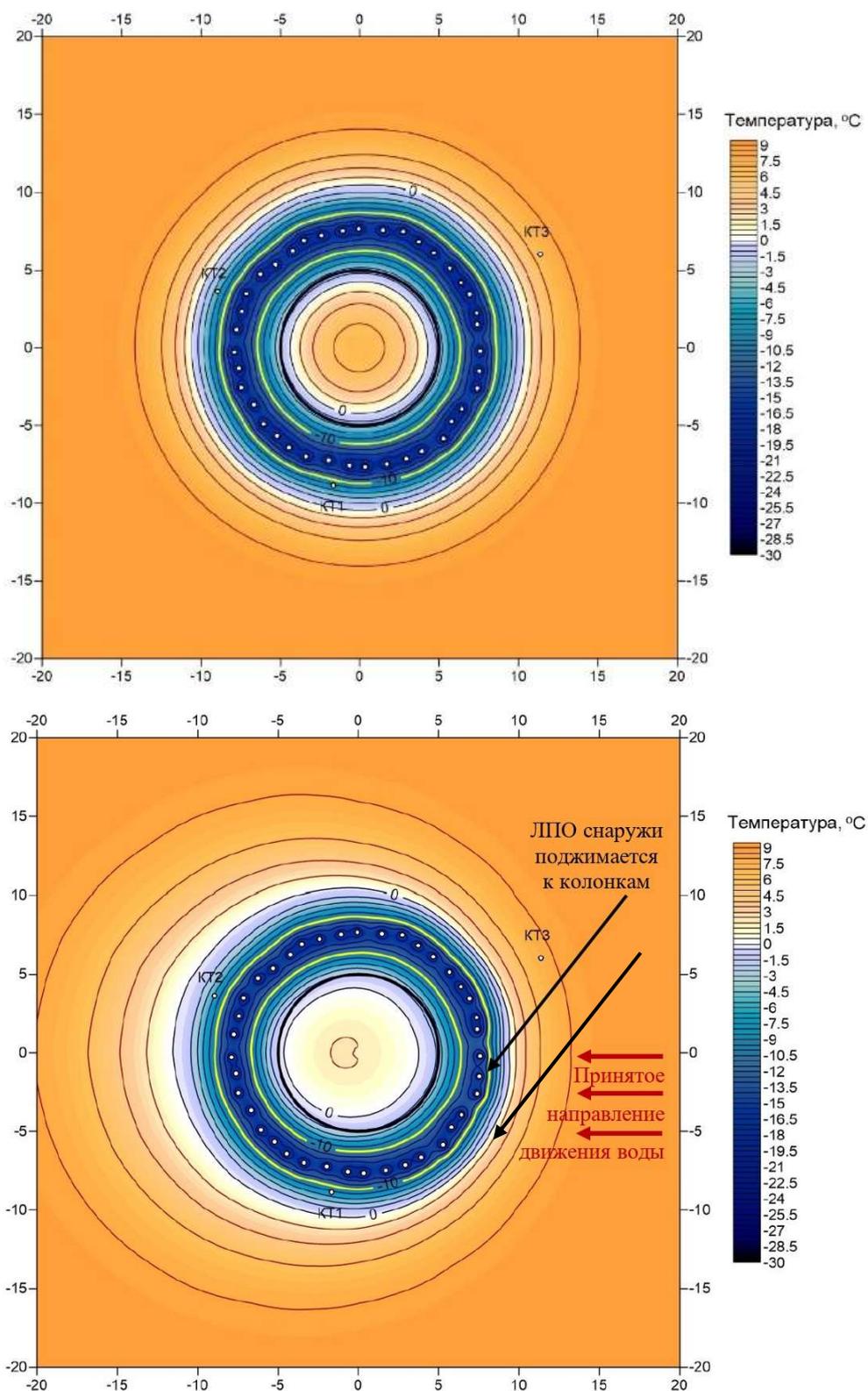


Рисунок 5.8 – Распределение температур в исследуемом слое в интервале 133,7-141,5 м без учета фильтрации подземных вод (вверху) и с учетом данного фактора (внизу). Видна осевая асимметрия западной и восточной сторон

Позднее стало ясно, что скорость нарастания толщины ЛПО с восточной стороны не отвечает темпам проходки ствола. В связи с этим был разработан ряд мероприятий, обеспечивающих сохранение безопасности ведения горных работ под защитой ЛПО меньшей толщины, но требуемой температуры. Осложняло ситуацию наличие в подошве водоносного пласта малого опорного башмака передовой бетонной крепи, увеличивающего радиус ствола в проходке. Прежде всего с учетом данного фактора обратными статическими расчетами была скорректирована максимально возможная высота заходки (отставания передовой бетонной крепи от забоя ствола в течение времени крепления 1 сутки) с 4,5 м до 2,5 м, при которой обеспечивалось соблюдение критериев прочности ЛПО и устойчивости к деформациям при той толщине, которой оно способно достичь к моменту начала проходки осложненного интервала глубин 133,7-141,5 м (рисунок 5.9).

Полный перечень разработанных мероприятий в дополнение к поддержанию ЛПО в заранее рассчитанном режиме работы замораживающей станции, включал следующее:

- бурение опережающих шпуров с забоя вниз на глубину 6,0 м после каждой зачистки, и их осмотр на водопроявления для исключения наличия «окон» в ЛПО в восточном секторе;
- при наличии самоизливающейся воды в шпурах — измерение дебита, откачка воды, по возможности тампонаж шпуров и остановку проходки до полного анализа ситуации;
- при отсутствии воды в шпурах — измерение температуры породы в забое каждого из них для сопоставления с результатами численного моделирования текущего температурного состояния массива и, при необходимости, для калибровки теплофизической модели на внутреннем контуре ЛПО;
- увеличение толщины раскоски с восточной стороны на 0,2 м (зоны отступа от оконтуривающих шпуров до стенки ствола при буровзрывных работах; раскоска разрабатывается отбойными молотками);
- проходку ствола в интервале глубин 133,7-141,5 м производить заходками малой высоты не более 2,5 м;
- разработку породы для обустройства опорного башмака производить непосредственно из-под закрепленной стенки.

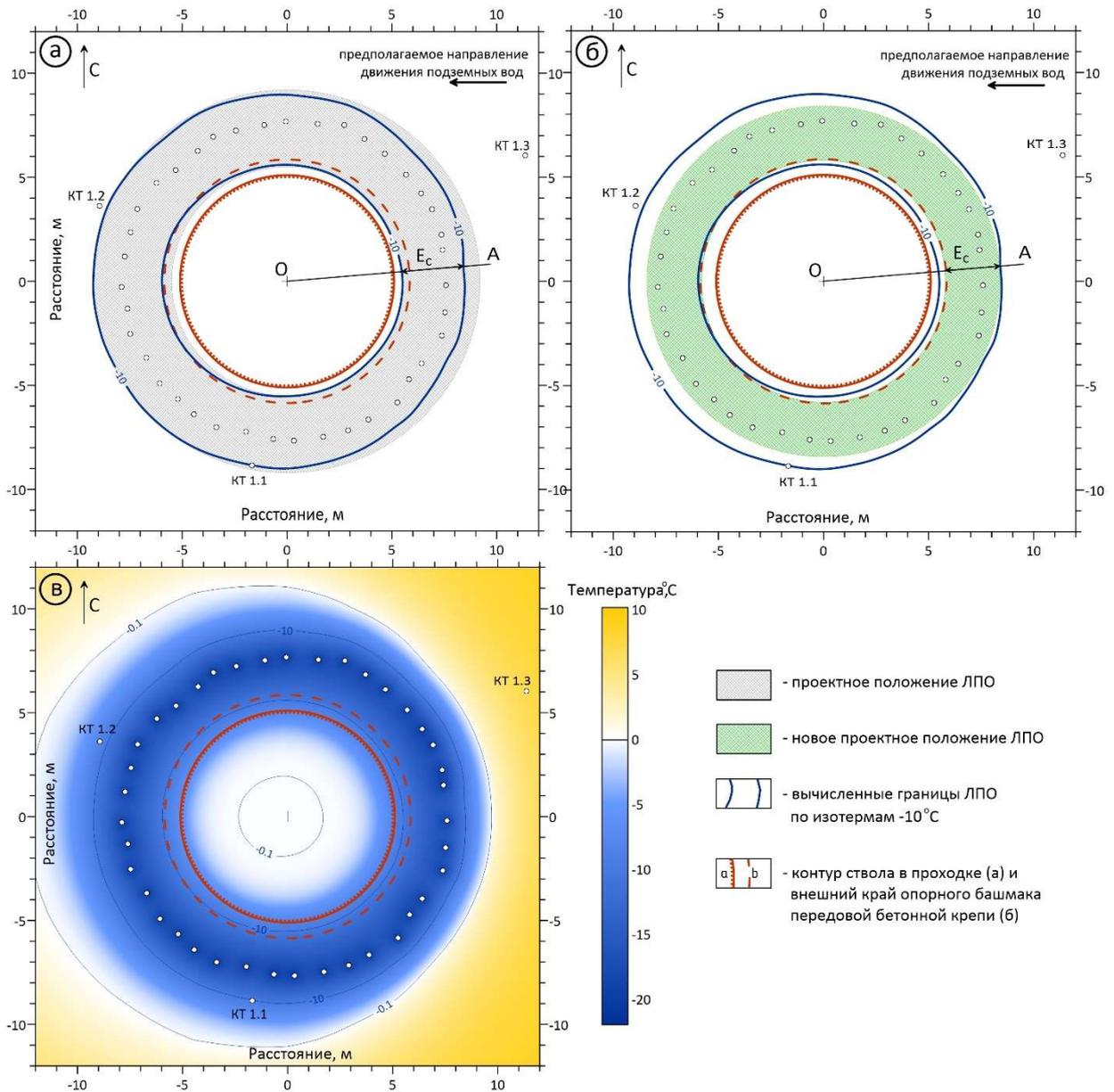


Рисунок 5.9 – Сопоставление фактических (расчетных) и проектных параметров ЛПО на начало проходки сложного интервала глубин 133,7-141,5 м: (а) проектное положение ЛПО для максимальной высоты заходки 4,5 м относительно контура ствола в проходке; (б) скорректированное проектное положение ЛПО для максимальной высоты заходки 2,5 м относительно внешней границы малого опорного башмака крепи; (в) вычисленное распределение температур с учетом движения подземных вод

Краткий ретроспективный анализ процесса искусственного замораживания, проведенный после полного завершения работ по искусственному замораживанию, показал, что даже в условиях длительного формирования ЛПО с необходимостью поддержания низких температур хладоносителя (ниже -20°C) в рассольной сети, но при гибком регулировании всего комплекса работ согласно концепции гибкого замораживания, суммарные затраты холодильной мощности замораживающего комплекса скипового ствола превысили проектное значение лишь на 14%, а в части расхода хладоносителя, косвенно

характеризующего затраты на работу насосного оборудования, экономия составила около 15%.

5.4 Управление тепловым состоянием породного массива на этапе размораживания ледопородного ограждения

Размораживание ЛПО может производиться искусственно (активно) с подогревом и циркуляцией хладоносителя в замораживающих колонках, и естественным образом (пассивно), без подогрева хладоносителя и его циркуляции или с сохранением протока рассола. Последнее предпочтительно, поскольку обеспечивает вертикальный теплоперенос по стволу замораживающей колонки, перераспределяя «холод», поступающий от горных пород.

При пассивном размораживании возможности активного вмешательства в процесс ограничиваются изменением расхода хладоносителя в рассольной сети и вентиляцией шахтного ствола. Основная экономия затрат на данном этапе обусловлена возможностью раннего отключения замораживающей станции.

Традиционно считается, что замораживающая станция может быть отключена только после полного завершения работ по возведению тубинговой крепи и чеканке стыковых соединений между ее элементами, поскольку передовая бетонная крепь является временной и не выполняет функции гидроизоляции ствола. Фактически же такое позднее отключение является непродуктивным по двум причинам: (а) лишние энергозатраты на работу холодильного оборудования и (б) последующие затраты на интенсификацию размораживания породы за крепью для последующего тампонажа, либо задержка начала тампонажных работ с необходимостью перераспределения стадийности технологических процессов.

Алгоритм действий для достижения указанной цели является следующим:

1. Функционал системы термометрического контроля расширяется за счет дополнительных оптоволоконных датчиков непрерывного контроля температуры, размещаемых в термометрических шпурах, пробуренных в крепи ствола.
2. Актуализированная теплофизическая модель калибруется по данным датчиков, обеспечивая высокую достоверность восстановления поля температур на внутреннем контуре ЛПО, т. е. породы, непосредственно примыкающей к крепи ствола.
3. На основе актуализированной и откалиброванной теплофизической модели производится серия прогнозных математических расчетов, и с учетом темпов

возведения тубинговой крепи определяется дата отключения замораживающей станции.

Следует отметить, что рассматривается случай монтажа тубинговой крепи в направлении «снизу-вверх» от забоя к устью ствола. Критерием для выбора даты по п. 3 является сохранение эксплуатационных характеристик ЛПО с момента отключения замораживающей станции до полного завершения работ по возведению тубинговой колонны.

Рассмотрим пример раннего отключения при строительстве клетового ствола Дарасинского рудника. Прогнозное моделирование выполнялось на откалиброванной теплофизической модели на основании показаний КТ скважин и оптоволоконных датчиков в крепи ствола, что позволяло учесть тепловое влияние нагретого воздуха, поступающего в забой ствола с температурой не ниже $+15^{\circ}\text{C}$. Подача нагретого воздуха позволяет интенсифицировать размораживание породы за крепью ствола при отключенной замораживающей станции для скорейшей подготовки закрепного пространства к тампонажу.

После отключения замораживающей станции температура замороженного массива начинает быстро повышаться и ЛПО теряет толщину при расчете последней по температуре, соответствующей геомеханическим испытаниям мерзлых пород. Температуропроводность породы в мерзлом и незамороженном состоянии становится главным фактором, определяющим скорость протекания данного процесса. Если лабораторные геомеханические испытания мерзлых пород производились при температуре -10°C и именно для этого значения температуры были определены прочностные и деформационные характеристики, то и требуемая толщина ЛПО была рассчитана также для породы с температурой испытаний, т. е. -10°C .

Когда температура породы внутри ЛПО всюду превышает -10°C , отсутствуют четкие количественные критерии, по которым можно судить о его прочности и устойчивости к деформациям даже при значительных размерах по границам мерзлой породы (по температуре начала замерзания воды в породе).

Поэтому лабораторные геомеханические испытания мерзлых пород из скважин на участках строительства стволов Дарасинского рудника выполнялись для нескольких значений температур, в том числе для значений -10°C и -4°C . Последнее значение ниже температуры замерзания воды в наименее промерзающем слое, в данном случае слой глины, но находится в области достаточно высоких отрицательных температур и позволяет выполнить статический расчет требуемой толщины ЛПО для породы с температурой -4°C . Результаты расчета приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Прогнозная послойная динамика снижения толщины ЛПО по температуре мерзлой породы -4°C при постоянном нагнетании в клетевой ствол нагретого воздуха с температурой не ниже $+15^{\circ}\text{C}$

№ слоя	Литология	Глубина подошвы, м	Требуемая толщина ЛПО по температуре -10°C , м	Фактическая толщина ЛПО по температуре -10°C , м	Требуемая толщина ЛПО по температуре -4°C , м	Сутки, прошедшие с даты отключения замораживающей станции									
						0	1	8	15	22	29	36	43	50	57
						Минимальная прогнозная толщина ЛПО, м									
1	Песок	18	0,15	4,08	0,45	5,75	5,75	5,71	5,60	5,43	5,20	4,88	4,51	4,02	3,30
2	Суглинок	24,5	0,32	4,18	0,61	5,88	5,88	5,84	5,73	5,56	5,33	5,03	4,65	4,16	2,36
3	Песок, сугл., супесь	33,5	0,49	4,24	1,43	5,96	5,97	6,02	6,01	5,93	5,79	5,59	5,31	4,97	4,47
4	Суглинок	41,1	0,60	4,12	1,43	5,77	5,77	5,78	5,78	5,77	5,75	5,73	5,71	5,68	5,65
5	Супесь, суглинок	50,0	0,78	4,48	1,68	6,22	6,22	6,19	6,09	5,94	5,71	5,43	5,06	4,60	3,95
6	Суглинок	60,5	0,86	4,51	1,35	6,28	6,28	6,26	6,19	6,07	5,90	5,67	5,39	5,00	4,45
7	Песок глин., супесь	72,3	0,95	4,45	2,94	6,19	6,19	6,19	6,11	5,99	5,81	5,57	5,26	4,87	4,27
8	Суглинок	82,9	1,36	4,23	2,27	5,81	5,82	5,82	5,76	5,66	5,52	5,36	5,16	4,90	4,51
9	Супесь, суглинок	97,3	1,56	4,34	3,05	6,00	6,00	5,99	5,92	5,81	5,65	5,44	5,19	4,90	4,46
10	Мел песчй, супесь	109,3	1,60	4,24	2,30	5,89	5,89	5,89	5,87	5,85	5,82	5,78	5,72	5,67	5,62
11	Песок, супесь	124,4	2,41	4,27	4,79	5,94	5,94	5,93	5,90	5,88	5,83	5,77	5,71	5,65	5,58
12	Песок, суглинок	133,7	2,55	4,19	4,49	5,77	5,77	5,75	5,67	5,57	5,41	5,19	4,92	4,57	2,51
13	Песчаник	143,0	2,82	3,30	4,61	4,19	4,18	4,06	3,91	3,75	3,54	3,34	3,13	2,85	1,79
14	Глина, известняк	154,8	0,53	3,11	1,54	5,41	5,42	5,42	5,40	5,38	5,37	5,34	5,30	5,24	5,19
15	Глина, глина аргилл.	162,1	1,52	3,23	5,01	5,33	5,33	5,34	5,34	5,32	5,30	5,27	5,23	5,19	5,14
16	Глина аргилл.	182,1	1,82	2,89	6,17	5,14	5,14	5,15	5,15	5,14	5,12	5,10	5,06	5,03	4,97
17	Глина аргилл.	187,1	2,12	2,37	7,87	4,92	4,92	4,92	4,90	4,86	4,80	4,77	4,73	4,69	4,66

В дальнейшем после отключения замораживающей станции контроль состояния ЛПО производится по параметрам, рассчитанным для более высокого значения отрицательной температуры -4°C , что позволяет продолжать количественное сопоставление его текущих параметров с требуемыми по критериям прочности и деформируемости, выполнять оценку его несущей способности.

Отталкиваясь от начального температурного состояния породного массива на заданный момент отключения замораживающей станции, путем математического моделирования были определены минимальные толщины ЛПО на конец 1-й и последующих недель (см. таблицу 5.1).

Из таблицы 5.1 видно, что в начальный момент времени ЛПО всюду имеет толщину не менее минимально требуемого значения по температуре -10°C , но менее требуемой по температуре -4°C в слоях 13, 16 и 17. В остальных слоях в течение последующих 57 суток (8 недель) после отключения замораживающей станции толщина ЛПО продолжает сохраняться выше требуемого значения.

С учетом среднего темпа работ по монтажу тубингов (2 тубинговых кольца в сутки) даны рекомендации по срокам отключения замораживающей станции. В данном случае отключение можно производить уже по достижении тубинговой колонной глубины 133,7 м (подошва слоя 12).

Проверочный расчет показывает, что для завершения работ по монтажу и чеканке тубингов с данной глубины необходимо $134 \text{ м} / (2 \text{ туб. кольца} \times 1,5 \text{ м}) = 45$ суток, что полностью соответствует прогнозируемому расчету времени, в течение которого ЛПО сохранит свои эксплуатационные свойства.

После отключения холодильное оборудование не отсоединяется от рассольной сети, а продолжает поддерживаться в состоянии готовности к возобновлению работы в случае возникновения внештатной ситуации или непредвиденной задержки в сроках монтажа тубинговой крепи. Раннее отключение замораживающей станции тем более важно, что позволяет сократить сроки размораживания породы за крепью при подготовке к тампонажным работам, которые являются завершающими при гидроизоляции ствола, и избежать длительной задержки в их выполнении.

5.5 Выводы по главе

1. Предложена концепция управления замораживанием (по требованию), состоящая из двух блоков: стратегического планирования и тактического (оперативного) реагирования на возникновение внештатной ситуации.

2. Основными аспектами предложенной концепции управления являются дифференцированный подход к интервалу замораживания массива горных пород, рассматривающий его не как единое однородное целое, а в виде совокупности слоев горных пород, а также комплексная минимизация затрат при одновременном сохранении безопасности ведения строительных работ.
3. Основу разработки наиболее рациональных технических решений по управлению режимом работы замораживающего комплекса дают результаты многовариантного математического моделирования процессов тепломассопереноса в системе «замораживающие колонки – породный массив – шахтный ствол» с использованием теплофизической модели, постоянно актуализируемой и откалиброванной в процессе термометрического контроля.
4. Оптоволоконная система термометрического контроля формирования и состояния ЛПО выполняет функцию обратной связи, измеряя отклик среды на корректировки режима работы замораживающего комплекса, показывая достаточность предпринятых действий.
5. Показано, что в рамках предложенной концепции управление режимом работы замораживающего комплекса обеспечивает выбор наиболее рационального решения на каждом из трех этапов искусственного замораживания: активного замораживания или формирования ЛПО, пассивного замораживания или поддержания ЛПО и размораживания ЛПО.
6. На этапе активного замораживания оперативное управление по требованию позволяет своевременно вывести из работы лишние холодильные блоки и более рационально перераспределить нагрузку на оставшиеся в зависимости от затрат холодильной мощности.
7. Управление по требованию в совокупности с подходом поинтервальной выдачи заключений о возможности проходки ствола позволяет сократить сроки ее начала, избежать значительного перемораживания породы в контуре проходки ствола в каждом интервале глубин, а также вызванной этим необходимостью изменения технологического процесса буровзрывных работ и снижения темпов строительства.
8. На этапе пассивного замораживания управление позволяет спланировать повышение температур таким образом, чтобы путем стратегического планирования снизить энергозатраты при одновременном сохранении несущей способности ЛПО, а в случае проявления внештатной ситуации – на основе

задействования блока оперативного реагирования выбрать наиболее рациональный режим работы замораживающего комплекса и, при необходимости, разработать ряд компенсирующих мероприятий.

9. На этапе размораживания ЛПО управление позволяет корректно рассчитать сроки раннего отключения замораживающей станции в зависимости от темпов сооружения тубинговой колонны, и тем самым избежать непродуктивных затрат на дальнейшее поддержание ЛПО, а также сократить сроки размораживания породы за крепью ствола при подготовке к завершающей стадии работ по его гидроизоляции – тампонажу закрепного пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи по разработке способа управления параметрами замораживающей станции и параметрами проходки на стадии пассивного замораживания и размораживания пород, и получены следующие основные научные результаты:

1. Проведен анализ временной динамики экспериментально измеренных эпюр температуры по глубине контрольно-термических скважин при формировании, поддержании и оттаивании ледопородного ограждения вокруг строящихся стволов калийных рудников.
2. Сформулирована и параметризована по данным экспериментальных измерений математическая модель системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь ствола».
3. Разработан новый критерий оценки несущей способности ледопородного ограждения, учитывающий неоднородное распределение теплофизических и прочностных свойств в объеме замороженных пород.
4. Проведено многопараметрическое численное моделирование искусственного замораживания пород для условий строящегося калийного рудника, в рамках которого показана эффективность предложенного критерия оценки несущей способности ледопородного ограждения при мониторинге и управлении замораживанием пород.
5. Разработаны новые принципы и способ управления параметрами замораживающей станции и параметрами проходки на стадиях пассивного замораживания и размораживания пород, что позволило реализовать на практике управление замораживанием «по требованию».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. 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.
3. Алексеев В.М., Калугин П.И. Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения: учеб.-метод. пособие. — Воронеж: Воронежский гос. арх.-строит. ун-т, 2009. — 89 с.
4. 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: 22.07.2024).
5. Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Численная модель динамики вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах. В книге: Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири Монография. В 5-ти томах. Под редакцией В.Г. Сычева, Л. Мюллера. — Москва, 2018. — С. 311-314.
6. 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.
7. Вартанов А.З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. — М.: Стройтехиздат. 2013. — 548 с.
8. 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.
9. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Т. 1. Математические модели. — Донецк: Норд-Пресс. 2008. — 632 с.
10. Вознесенский А.С. Системы контроля геомеханических процессов. — М.: МГГУ. 2002. — 149 с.

11. ВСН 189-78. Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. - М.: ЦНИИС, 1978. - 68 с.
12. Вялов С.С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений. — М.: Из-во Ак. Наук СССР, 1962. — 253 с.
13. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. — 1978. — 447 с.
14. Гарбер В. А. Нештатные ситуации при строительстве и эксплуатации Московского метрополитена за последние 40 лет // Метро и тоннели. — 2014. — № 3. — С. 34-35.
15. Головатый И. И. Разработка принципов интеллектуального управления искусственным замораживанием пород при строительстве стволов калийных рудников // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей : материалы IV Международной научно-практической конференции, Пермь, 2023. – С. 236-242.
16. Головатый И.И., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Диулин Д.А. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов // Горный журнал. – 2018. – №. 8. – С. 48-53.
17. Головатый И.И., Левин Л.Ю., Семин М.А., Пугин А.В. Реализация принципов замораживания “по требованию” при строительстве стволов Дарасинского рудника // Горный журнал. 2023. №8. С. 34-39.
18. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. М.: Наука. 1984. — 230 с.
19. 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.
20. Дорман Я.А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов. — М.: Транспорт. 1981. — 302 с.
21. 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.
22. Ершов Э.В. Общая геокриология. Учебник — М.: Изд-во МГУ. 2002. — 682 с.

23. Иенминь Ма, Шурен Ван. Проходка стволов в неустойчивых обводненных породах на шахтах КНР — Глюкауф (русс. изд). 1985. № 19. — с. 14 — 18.
24. Инструкция по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на территории Республики Беларусь. — Минск, Солигорск: ОАО «Беларуськалий», 2019. — 96 с.
25. 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.
26. Картозия Б.А. Пути совершенствования способа искусственного замораживания горных пород при сооружении шахтных стволов: дис. ... канд. техн. наук — М. 1969. — 230 с.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.

33. Маньковский Г.И. Специальные способы проходки горных выработок. — М.: Углетехиздат, 1958. — 452 с.
34. Мейрманов А.М. Задача Стефана. — Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 1986. — 240 с.
35. Мишедченко О. А. История развития способа искусственного замораживания пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2010. — №. 2. — С. 226-231.
36. Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н., Ресин В.И. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства. — М.: Недра. 1992. — 352 с.
37. Новиков Е.А., Шкуратник В.Л. Геоконтроль на горных предприятиях. — ИД МИСиС. 2019. — 174 с.
38. Ольховиков Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра. 1984. — 238 с.
39. Отчет по дог. №87П-2019 «Изучить теплофизические свойства горных пород по данным скважин, пробуренным на площадке Дарасинского рудника». — Минск: Институт природопользования НАН Беларуси, 2019. — 271 с.
40. Отчет по дог. №45-17, этап 2.4.1 «Выполнение комплекса лабораторных исследований кернового материала скважин №1к, 1в (в т. ч. физико-механические свойства, деформационные характеристики горных пород, химический состав горных пород калийных горизонтов). Определение химического состава подземных вод». — Минск: ОАО «Белгорхимпром», 2019. — 545 с.
41. Отчет по дог. о НИР №145/2019, этап 4. «Разработка основных технических решений для проекта на замораживание горных пород, контроль формирования и состояния ледопородных ограждений на основе оптоволоконной термометрической технологии и определение прочностных и деформационных характеристик ледопородного ограждения в зависимости от температуры горной породы при проходке шахтных стволов № 1 и № 2 Дарасинского рудника». — Пермь: «ГИ УрО РАН», 2021. — 122 с.
42. Отчет по дог. №87П-2019 «Изучить теплофизические свойства горных пород по данным скважин, пробуренным на площадке Дарасинского рудника». — Минск: Институт природопользования НАН Беларуси, 2019. — 271 с.

43. Паланкоев И.М. Обоснование параметров технологии проходки шахтных стволов в искусственно замороженных породах: дис. ... канд. техн. наук — М. 2015. — 189 с.
44. Паланкоев И. М. Особенности формирования ледогрунтовых ограждений в подземном пространстве мегаполисов // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. – 2014. – №. 5-3. – С. 243-258.
45. Паршаков О. С. Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений // дисс. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2020. – 140 с.
46. Патент № 038447 (ЕАПО). Сквжинный оптоволоконный датчик непрерывного контроля температуры / Головатый И.И., Барбиков Д.В., Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А., Дьяконов А.С.; заявитель и патентообладатель: ОАО «Беларуськалий», ПФИЦ УрО РАН. — № 2019000097; заявл. 06.09.2019; опубл. 30.08.2021, Бюллетень № 8. — 4 с.
47. Патент № 2809873. Способ определения и контроля несущей способности ледопородных ограждений строящихся стволов шахт для регулирования параметров работы замораживающих станций и система для осуществления способа / Семин М.А., Левин Л.Ю., Головатый И.И., Бублик С.А.; заявитель и патентообладатель: ПФИЦ УрО РАН. — № 2023111825; заявл. 28.04.2023; опубл. 19.12.2023, Бюллетень № 35. — 13 с.
48. Риз А. Историческое и техническое развитие способа проходки стволов замораживанием — Глюкауф (русс. изд.). 1982. № 2. — с. 3 — 13.
49. Роменский А.А. Обоснование параметров проходческого цикла и ледопородного ограждения при строительстве вертикальных стволов: дисс. ... канд. техн. наук — Москва. 1983. — 227 с.
50. Семин М. А., Богомягков А. В., Левин Л. Ю. Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 319-328.
51. Семин М. А., Головатый И. И., Бородавкин Д. А. Анализ методов расчета теплоотдачи между хладоносителем в замораживающей колонке и окружающими породами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №. 3. – С. 154-163.

52. Семин М.А. Левин Л.Ю., Пугин А.В. Расчет земных теплопритоков при искусственном замораживании породного массива // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 162-171
53. Семин М.А. Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород // дисс. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2022. – 313 с.
54. 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. 134.
55. 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.
56. Трест «Шахтспецстрой» 65 лет деятельности и развития специальных способов проходки шахтных стволов. — М. 2008. — 346 с.
57. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. — М.: Углетехиздат. 1954. — 896 с.
58. Трупак Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. — М.: Недра. 1974. — 281 с.
59. Трупак Н.Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных стволов шахт. — М.: Недра. 1983. — 270 с.
60. Тютюнник П.М., Роменский А.А. Комплексный контроль ледопородного ограждения при сооружении ствола шахты. — Шахтное строительство. 1984. № 11. — с. 14 — 19.
61. Хакимов Х.Р. Замораживание грунтов для строительных целей. — Москва. 1949. — 112 с.
62. 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.

63. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников : : дисс. ... доктора технических наук. - Пермь : 2012. – 329 с.
64. 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.
65. Федюкин В.А. Проходка стволов шахт способом замораживания. — М.: Недра. 1988. — 352 с.
66. Afshani A., Akagi. H. Artificial ground freezing application in shield tunneling // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2015. – Т. 3, № 2. – С. 71-75.
67. Alifanov, O. M. (1983). Methods of solving ill-posed inverse problems. *Journal of engineering physics*, 45(5), 1237-1245.
68. Alzoubi M.A., Nie-Rouquette A., Ghoreishi-Madiseh S.A., Hassani F.P., Sasmito A.P. On the concept of the freezing-on-demand (FoD) in artificial ground freezing for long-term applications // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Т. 143. – Статья № 118557.
69. Alzoubi M.A., Sasmito A.P., Madiseh A., Hassani F.P. Intermittent freezing concept for energy saving in artificial ground freezing systems // *Energy Procedia*. — 2017. — Т. 142. — С. 3920-3925.
70. 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.
71. Alzoubi M. A., Zueter A., Nie-Rouquette A., Sasmito A. P. Freezing on demand: A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines // *International Journal of Mining Science and Technology*. — 2019. — Т. 29, № 4. — С. 621-627.
72. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. — Springer US. 1994. — 352 p.
73. Bekele Y. W., Kyokawa H., Kvarving A. M., Kvamsdal T., Nordal S. Isogeometric analysis of THM coupled processes in ground freezing // *Computers and Geotechnics*. – 2017. – Т. 88. – С. 129-145.
74. 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.

75. Bouyoucos G.J. Degree of temperature to which soils can be cooled without freezing // *Journal of Agricultural Research*. — 1920. — № 20. — pp. 267-269.
76. Brentle J.O., S. Grosswig S. The application of fibre optic measurement techniques in the mining sector, the oil & gas industry as well as in geothermal project. — 8-th Asian Rock Mechanics Symposium, 14-16 October 2014, Sapporo, Japan.
77. 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.
78. Dirksen C., Miller R.D. Closed-system freezing of unsaturated soil. — *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966. No. 30. — pp. 168 — 173.
79. Fisher R.A. The freezing of water in capillary systems: A critical discussion // *Journal of Physical Chemistry*. — 1924. — № 28. — pp. 36-67.
80. 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.
81. 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.
82. Han C., Yu X. B. Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system // *Applied Energy*. — 2016. — T. 170. — C. 148-160.
83. 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.
84. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. — *Water Resource Research*. 1973. No. 9. — pp. 1314 — 1323.
85. Harris J. S. *Ground freezing in practice*. — Thomas Telford, 1995. — 264 c.
86. Harris C. S. (ed.). *Engineering geology of the channel tunnel*. — Thomas Telford, 1996. — 526 c.
87. 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.
88. Hou S., Yang Y., Cai C., Chen Y., Li F., Lei D. Modeling heat and mass transfer during artificial ground freezing considering the influence of water seepage // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2022. —194. — Статья № 123053.

89. Hu R., Liu Q., Xing Y. Case study of heat transfer during artificial ground freezing with groundwater flow // *Water*. – 2018. – Т. 10. – №. 10. – Статъя № 1322.
90. Huang, S., Guo, Y., Liu, Y., Ke, L., & Liu, G. (2018). Study on the influence of water flow on temperature around freeze pipes and its distribution optimization during artificial ground freezing. *Applied Thermal Engineering*, 135, 435-445.
91. Huang S.-B., Liu Q.-S., Cheng A.-P., Liu Y.-Z. A coupled hydro-thermal model of fractured rock mass under low temperature and its numerical analysis // *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. – 2018. – Т. 39, № 2. – С. 735–744.
92. Jame Y.W., Norum D.I. Heat and mass transfer in freezing unsaturated porous media. — *Water Resource Research*. 1980. Vol. 16. — pp. 811-819.
93. Ji Y., Zhou G., Vandeginste V., Zhou Y. Thermal-hydraulic-mechanical coupling behavior and frost heave mitigation in freezing soil // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2021. – Т. 80, №. 3. – статъя № 2701-2713.
94. 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.
95. Kong B., He S., Xia T., Ding Z. Research on Microstructure of Soft Clay under Various Artificial Ground Freezing Conditions Based on NMR // *Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11(4). – Статъя № 1810.
96. 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.
97. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. Numerical simulation of freezing pipe deformation during artificial ground freezing // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Т. 18. – С. 293-300.
98. 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.
99. Lackner R., Amon A., Lagger H. Artificial ground freezing of fully saturated soil: thermal problem // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2005. – Т. 131. № 2. – С. 211-220.
100. Lackner R., Pichler C., Kloiber A. Artificial ground freezing of fully saturated soil: viscoelastic behavior // *Journal of engineering mechanics*. – 2008. – Т. 134. – №. 1. – С. 1-11.

101. Levin L., Semin M., Golovaty I. Analysis of the structural integrity of a frozen wall during a mine shaft excavation using temperature monitoring data // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2023. – Т. 17. – №. 63. – С. 1-12.
102. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2021. – Т. 107. – Статья № 103685.
103. Liu J., Yang P., Yang Z. J. Electrical properties of frozen saline clay and their relationship with unfrozen water content // *Cold Regions Science and Technology*. – 2020. – Т. 178. – Статья № 103127.
104. Michalowski R.L., Zhu M. Frost heave modeling using porosity rate function. — *Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2006. No. 30. — pp. 703 — 722.
105. 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.
106. 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.
107. Nixon J.F. Discrete ice lens theory for frost heave beneath pipelines. — *Canadian Geotechnical Journal*. 1992. Vol. 29. pp. 487 — 497.
108. 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.
109. Rouabhi A., Jahangir E., Tounsi H. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Т. 120. – С. 523-533.
110. Sanger F. J. Ground freezing in construction // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. – 1968. – Т. 94. – №. 1. – С. 131-158.
111. Schofield R.K. The PF of the water in soil. — *Transactions 3rd International Congress of Soil Science*. 1935. Vol. 2. — pp. 37 — 48.
112. Semin, M. A., Bogomyagkov, A. V., & Levin, L. Y. (2020). Theoretical analysis of frozen wall dynamics during transition to ice holding stage. *Journal of Mining Institute*, 243, 319-328

113. Semin, M.A., Brovka, G.P., Pugin, A.V., Bublik, S.A., Zhelnin, M.S. (2021). Effects of temperature field nonuniformity on strength of frozen wall in mine shafts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2021, 2021(9), 79–93.
114. Semin M., Golovaty I., Levin L., Pugin A. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2024. – Т. 18. – СтАТЬЯ № 100710.
115. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of temperature anomalies during thermal monitoring of frozen wall formation // *Fluids*. – 2021. – Т. 6. – №. 8. – СтАТЬЯ № 297.
116. Semin M., Levin L., Bogomyagkov A., Pugin A. Features of adjusting the frozen soil properties using borehole temperature measurements // *Modelling and Simulation in Engineering*. – 2021. – Т. 2021. – №. 1. – СтАТЬЯ № 8806159.
117. Semin M. A., Levin L. Y., Parshakov O. S. Selection of working conditions and substantiation of operating mode of freezing pipes in maintenance of frozen wall thickness // *Journal of Mining Science*. – 2020. – Т. 56. – С. 857-867.
118. Shen Y., Wang Y. Z., Zhao X. D., Yang G. S., Jia H. L., Rong T. L. The influence of temperature and moisture content on sandstone thermal conductivity from a case using the artificial ground freezing (AGF) method // *Cold Regions Science and Technology*. – 2018. – Т. 155. – С. 149-160.
119. Schmall P., Brinckerhoff P., Ott K., Madsen P. ESA’s SEM challenge. — *North American Tunneling Journal*. 2013. — pp. 24 — 26.
120. Sopko J. Ground Control. — *Tunnels and tunneling. Technical/Geotechnical Engineering*. — October-November 2017. — pp. 34 — 37.
121. 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.
122. 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.
123. 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. ITAAITES World Tunnel Congress*. 2019. pp. 1599 — 1606.
124. Tran-Valade T., Allen. C. Ventilation-On-Demand key consideration for the business case // *Proceedings of the Toronto 2013 CIM Conference*. Toronto. Canada. 2013.
125. Transit I. R., Cudahy B. *The New York Subway, Its construction and Equipment*. – INTERBOROUGH RAPID TRANSIT CO., N.Y.: 1991. – 154 с.

126. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities // *Computers and Geotechnics*. – 2015. – T. 63. – C. 99-111.
127. Vitel, M., Rouabhi, A., Tijani, M., & Guérin, F. (2016). Thermo-hydraulic modeling of artificial ground freezing: Application to an underground mine in fractured sandstone. *Computers and geotechnics*, 75, 80-92.
128. Vyalov S. S., Zaretsky Y. K., Gorodetsky S. E. Stability of mine workings in frozen soils // *Engineering Geology*. – 1979. – T. 13. – №. 1-4. – C. 339-351.
129. Wallace K., Prosser B., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2015. – T. 25. – №. 2. – C. 165-169.
130. Yan Q., Wu W., Zhang C., Ma S., Li Y. Monitoring and evaluation of artificial ground freezing in metro tunnel construction-a case study // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2019. – T. 23, – C. 2359-2370.
131. Zhang, B., Yang, W., & Wang, B. (2018). Plastic design theory of frozen wall thickness in an ultradeep soil layer considering large deformation characteristics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
132. Zhang C., Wang X., Yan Q., Vipulanandan C., Song G. A novel method to monitor soft soil strength development in artificial ground freezing projects based on electromechanical impedance technique: Theoretical modeling and experimental validation // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2020. – T. 31. – №. 12. – C. 1477-1494.
133. Zhang S., Zhou X. M., Zhang J., Sun T., Ma W., Liu Y., Yang N. A Case Study of Energy-Saving and Frost Heave Control Scheme in Artificial Ground Freezing Project // *Geofluids*. – 2022. – № 3. – C. 1-15.
134. 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.
135. Zhou Y., Zhou G. Intermittent freezing mode to reduce frost heave in freezing soils— experiments and mechanism analysis // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2012. – T. 49. – №. 6. – C. 686-693.
136. Zueter A. F. Madiseh A. G., Hassan, F. P., & Sasmito A. P. Effect of freeze pipe eccentricity in selective artificial ground freezing applications // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. – 2022. – T. 14. – №. 1. – Статья № 011015.