

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2025

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

Научный руководитель: **Левин Лев Юрьевич**

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, доцент, заведующий отделом аэрологии и теплофизики «ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные
оппоненты:

Качурин Николай Михайлович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Механики материалов и геотехнологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет (г. Тула).

Курилко Александр Сардокович

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной теплофизики федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук (г. Якутск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II**» (г. Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится «07» октября 2025 года в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permisc.ru>.

Автореферат разослан «__» августа 2025 года. Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, представившего его.

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

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук



С. Ю. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

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 натурного 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 тепломассопереноса, 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 зависимостью 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 гг.), 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** работы проведен обзор существующей литературы по вопросам проектирования организации работ по замораживанию горных пород, моделям и методам теплофизического расчета ЛПО, организации мониторинга и управления замораживанием пород при проходке шахтных стволов и других подземных сооружений. Выявлены недостаточно проработанные аспекты проектирования систем мониторинга и управления замораживанием пород, на основании чего сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В **главе 2** описано современное понимание массива горных пород как сложной неоднородной анизотропной трехфазной среды, меняющей свои свойства с глубиной (из-за давления) и при изменении температуры (особенно вблизи фазового перехода), основанное на опубликованных результатах теоретических работ и анализа натурных измерений температуры в контрольно-термических (КТ) скважинах при проходке шахтных стволов Петриковского и Дарасинского рудников с использованием способа искусственного замораживания пород.

Распределенные измерения температуры по глубине КТ скважин проводились с использованием оптоволоконного кабеля. Пространственное разрешение измерений по глубине составляло 25 см, абсолютная погрешность измерения температуры – 0,2 °С. На рис. 1 показаны распределения температуры по глубине КТ скважин при строительстве скипового ствола Дарасинского рудника. Всего около каждого ствола было установлено 4 КТ скважины – три снаружи контура замораживающих колонок

(КТ-1,2,3) и одна внутри (КТ-4). После начала углубки стволов КТ скважины внутри контура замораживающих колонок ликвидировались.

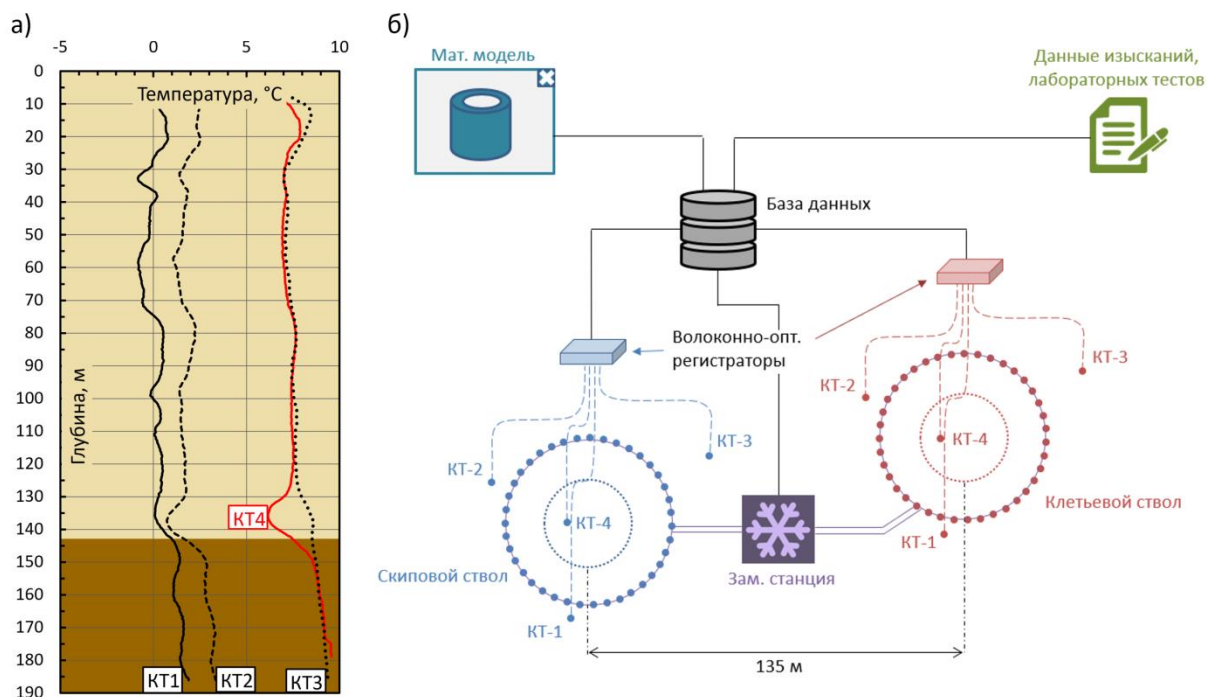


Рис. 1. Распределения температуры по глубине КТ скважин при строительстве скипового ствола Дарасинского рудника (а); система термометрического контроля (б)

Данные натуральных измерений в КТ скважинах использовались в главе 3 для параметризации и валидации используемой математической модели теплопереноса в охлаждаемом и замораживаемом породном массиве.

Рассматриваемый породный массив представлял собой наложение горизонтальных слоев пород с однородными теплофизическими свойствами. Горизонтальные слои пород имели толщины от 10 м и выше. При рассмотрении срединных горизонтальных срезов этих слоев пород аргументировано была принята гипотеза о малости вертикальных теплоперетоков, что позволяет рассмотреть процессы теплопереноса только в горизонтальной плоскости каждого из слоев.

Основу математической модели составило уравнение баланса теплоты

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right), \quad (1)$$

включающее в себя кондуктивный теплоперенос в породах (слагаемые справа) и изменение теплосодержания внутри каждого отдельно выделенного малого объема пород (слагаемое слева). Здесь H – удельная энтальпия обводненного породного массива, Дж/м³; λ – теплопроводность породного массива, являющаяся функцией

температуры, Вт/(м·°C); r, φ – полярные координаты, м, °; t – физическое время, с; T – температура пород, °C.

Информация о фазовом переходе поровой воды в лёд учитывалась посредством специфического задания зависимости удельной энтальпии H от температуры. При переходе через температуру замерзания поровой воды функция H испытывала скачок, равный скрытой теплоте кристаллизации воды, занимающей весь поровый объем.

На стенках замораживающих колонок задавались граничные условия в виде заданного теплового потока от породного массива к рассолу. Соответствующий тепловой поток q определялся по закону Ньютона-Рихмана исходя из разницы температур между породным массивом и рассолом, умноженной на коэффициент теплоотдачи α , который характеризует интенсивность теплопередачи через тонкий пограничный слой рассола вблизи стенки колонки:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_{pb}(t) - T), \quad (2)$$

где n – координата вдоль нормали к стенке колонки, м; $T_{pb}(t)$ – температура рассола в замораживающих колонках, °C.

На внешней границе области на некотором достаточно большой удалении от контура замораживания (область термически непо потревоженного массива) задавалось условие постоянной температуры T_0 . Система уравнений также дополнялась начальным условием, согласно которому в нулевой момент времени весь породный массив в рассматриваемом горизонтальном срезе имел постоянную температуру T_0 .

Решение полной системы уравнений осуществляли с использованием метода конечных разностей в программе Frozen Wall, разработанной при участии автора работы. Для решения использовалась регулярная неоднородная сетка со сгущением вблизи замораживающих колонок.

Начальные значения всех теплофизических свойств породного массива, использованные при расчетах, брались на основании лабораторных исследований образцов пород. Далее в процессе натурного мониторинга температур в КТ скважинах для каждого из слоев пород производились корректировки модельных теплопроводностей и влажности породного массива с целью обеспечения наилучшего соответствия между измеренными и рассчитанными температурами в местах расположения КТ скважин. Для этого минимизировали функцию рассогласования между измеренными $T_i^{(m)}$ и рассчитанными $T_i^{(c)}$ температурами в месте расположения КТ скважин:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N_C} \frac{1}{\Delta T^2} \sum_{i=1}^{N_C} (T_i^{(m)} - T_i^{(c)})^2}, \quad (3)$$

где N_C – количество контрольных скважин; ΔT – характерная разница температур в рассматриваемой задаче, °С. В качестве ΔT взята разница начальной температуры массива и температуры хладоносителя в замораживающих колонках.

Минимизация функции (3) осуществлялась путем подбора теплофизических свойств породного массива (теплопроводностей в зонах охлаждения и льда, влажности), которые в данном случае являлись параметрами оптимизации. Для обеспечения единственности решения обратной задачи использовали дополнительное условие о том, что оптимизируемые теплофизические свойства породного массива должны иметь в среднем минимальное отклонение от своих начальных значений.

Проведенное моделирование процесса замораживания различных слоев пород позволило установить закономерности временных изменений поля температур в объеме ЛПО на стадиях активного, пассивного замораживания, а также размораживания пород. Для различных слоев пород показано, что при переходе с активного на пассивное замораживание характер неоднородности поля температур сильно меняется (см. рис. 2). Теплофизические свойства пород представлены в табл. 1.

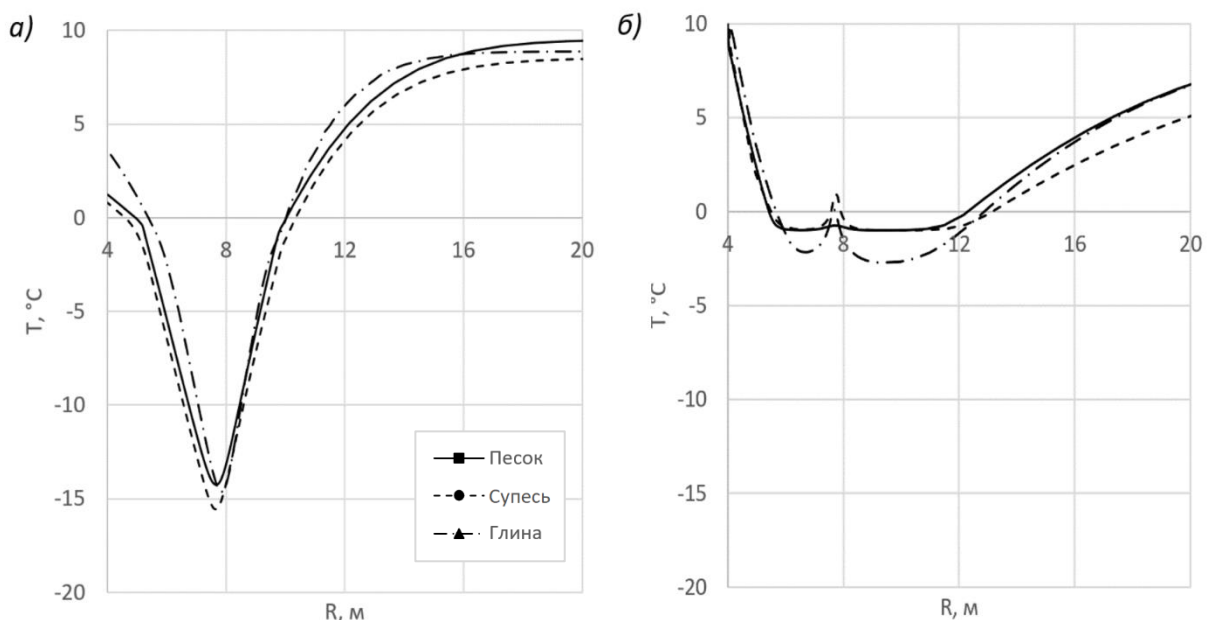


Рис. 2. Расчетные распределения температуры вдоль срединного среза ЛПО в моменты времени 4 месяца (а), и 20 месяцев (б)

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 и, следовательно, на среднюю прочность замороженных пород.

Табл. 1. Теплофизические свойства слоев пород

Слой	Интервал глубин, м	T_0 , °C	w , кг/кг	λ_{fr} , Вт/(м·°C)	λ_{un} , Вт/(м·°C)	C_{fr} , Дж/(кг·°C)	C_{un} , Дж/(кг·°C)	ρ , кг/м ³
Песок	2,1–18	9,5	0,117	3,9	2,8	908	1096	2110
Супесь	82,9–97,3	8,5	0,167	3,27	2,36	996	1131	2250
Глина	141,5– 154,8	8,88	0,177	1,51	1,16	993	1259	2160

При этом само понятие толщины ЛПО, рассчитанной по изотермам начала фазового перехода воды в лед, как способ оценки несущей способности ЛПО в данном случае теряет свою адекватность: толщина ЛПО в момент времени 20 месяцев (см. рис. 2б) больше, чем в момент времени 4 месяца (см. рис. 2а), 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 рис. 3.

Также в работе выявлены интересные особенности дальнейшей эволюции ЛПО при переходе от пассивного замораживания к размораживанию. 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 ее размеры остаются достаточно большими (см. рис. 4).

Проведено численное моделирование длительного размораживания пород. Принималось, что после завершения возведения бетонной крепи, установки тубинговой крепи и тампонирующего закрепного пространства циркуляция теплоносителя остановлена, а замораживающие трубы демонтированы. Теплота от стенки ствола было постоянной в течение всего расчетного периода. Температурные кривые на рис. 4 показывают, что замороженная порода оттаивает медленно и полностью переходит в область положительных температур примерно через 5 лет.

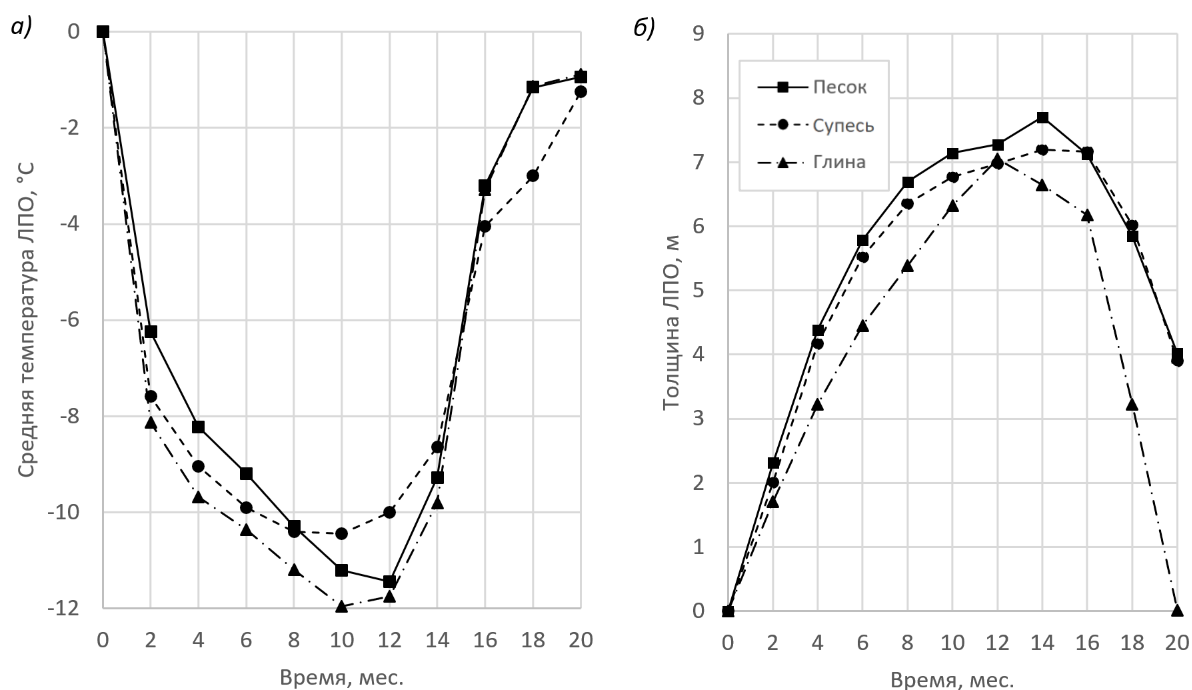


Рис. 3. Временные зависимости средней температуры (а) и толщины ЛПО, рассчитанной по изотерме начала заморозки воды, (б) для трех различных слоев пород

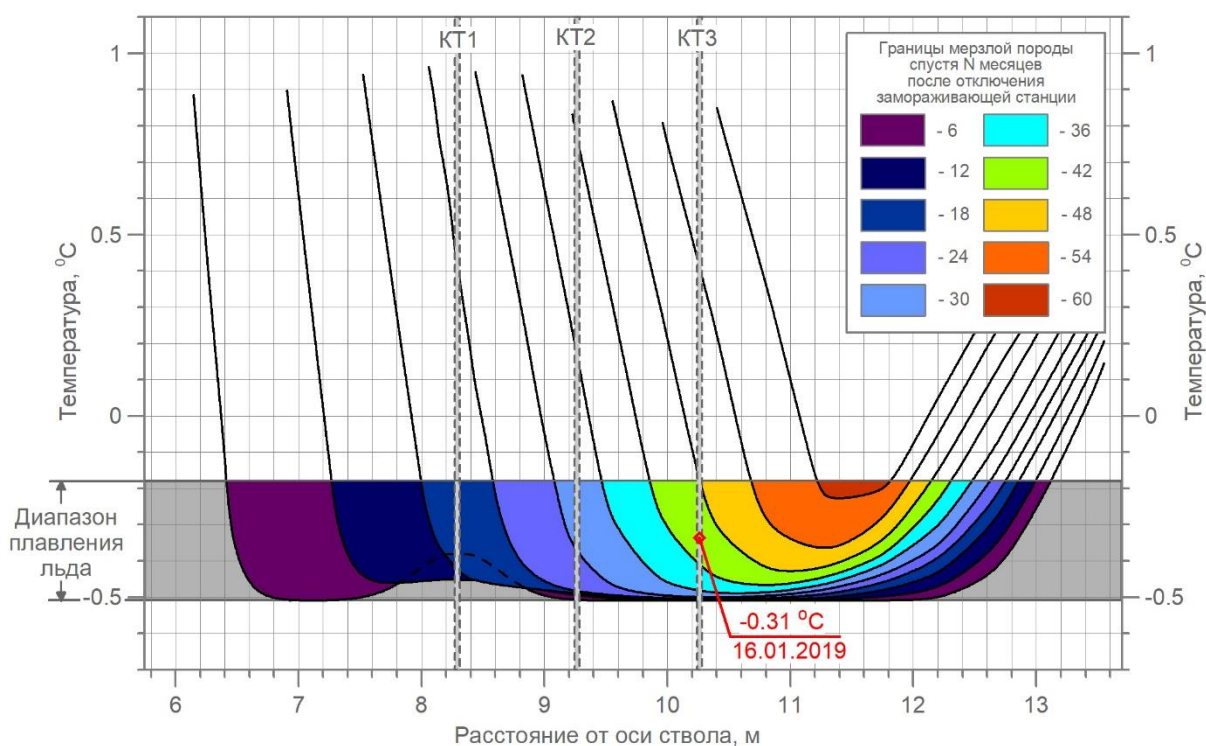


Рис. 4. Результаты численного моделирования при длительном времени оттаивания в слое песчаника на глубине 150 м

Таким образом, по результатам исследований, описанных в главах 2-3 работы, вынесено **I научное положение**:

Закономерности временной динамики неоднородного поля температур в замороженных породах на всех стадиях искусственного замораживания, установленные в результате серии численных расчетов на математической модели тепломассопереноса, параметры которой актуализированы с помощью данных непрерывного натурного мониторинга температур в замороженных породах.

С учетом полученного вывода о неприменимости классического критерия оценки несущей способности ЛПО, в **главе 4** предложен и обоснован новый критерий количественной оценки несущей способности ЛПО. Его идея состоит в том, что при мониторинге и управлении искусственным замораживанием пород в качестве критерия следует использовать не толщину ЛПО, которая сложным и неочевидным образом характеризует его несущую способность, а напрямую вычислять предельную несущую способность P в каждый заданный момент времени.

Для расчета P (Па) предложено воспользоваться выражением, связывающим внешнюю нагрузку на ЛПО и его прочностные и геометрические свойства в виде:

$$P = 2 \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) b^{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - 1} \int_a^b \frac{c(r)}{r^{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)}} dr, \quad (4)$$

где a – радиус внутренней границы ЛПО, м; b – радиус внешней границы ЛПО, м; P – внешнее давление, Па; $c(r)$ – структурное сцепление породы как функция радиальной координаты r , Па; φ – угол внутреннего трения, рад.

Помимо формулы (4) для сравнения и оценки предельной внешней нагрузки на ЛПО в работе использовалась формула С.С. Вялова для случая конечной высоты незакрепленного породного массива, вошедшая в Инструкцию по замораживанию пород на рудниках ОАО «Беларуськалий»:

$$b - a = \xi \frac{hP}{\sigma_c} \rightarrow P = \frac{\sigma_c (b - a)}{h\xi}, \quad (5)$$

где σ_c – прочность замороженных пород на одноосное сжатие, усредненная по объему ЛПО, Па; h – высота заходки, м; ξ – коэффициент, определяемый исходя из характера защемления верхнего и нижнего торцов незакрепленного участка ЛПО.

Параметры a и b в различные моменты времени определяли исходя из рассчитанных полей температуры, представленных в **главе 2** работы. Прочностные свойства рассматриваемых слоев пород определяли из лабораторных испытаний образцов пород на прочность при различных температурах. Аппроксимирующие

линейные функции предельно-длительных значений прочностных свойств пород от температуры представлены в табл. 2. В формуле (4) прочность замороженных пород на одноосное сжатие определяется исходя из средней температуры ЛПО. Высота заходки с некоторым запасом принималась равной 5 м, а коэффициент ξ равен 1,73.

Табл. 2. Линейные аппроксимации температурных функций предельно-длительных значений прочностных свойств пород

Но.	Слой	Сцепление, МПа	Тангенс угла внутреннего трения, °	Прочность на одноосное сжатие, МПа
1	Песок	$0,814-0,121 T$	$0,436-0,0047 T$	$0,842-0,326 T$
2	Супесь	$0,729-0,117 T$	$0,304-0,0046 T$	$0,476-0,381 T$
3	Глина	$0,447-0,119 T$	$0,080-0,0072 T$	$1,095-0,276 T$

Оценка несущей способности ЛПО производилась в терминах предельной внешней нагрузки, которую оно способно выдержать при заданных теплофизических условиях, полученных из расчета по тепловой модели (1)-(2), параметризованной по данным натурных наблюдений. По имеющимся данным о неоднородности поля температуры в ЛПО, его геометрических размерах и прочностных свойствах пород можно рассчитать временные зависимости предельной нагрузки на ЛПО по формулам (4) и (5). Полученные временные зависимости представлены на рис. 5, из которого видно, что в целом на протяжении 12 месяцев для всех рассмотренных слоев пород происходит набор прочности ЛПО. Далее начиная с 14 месяцев из-за уменьшения минимальной и средней температур в объеме ЛПО несущая способность снижается, чего нельзя сказать о толщинах ЛПО, рассчитанных по изотерме начала замерзания поровой воды (см. рис. 3б). Так для песка и супеси толщина ЛПО меняется незначительно вплоть до момента времени 16 месяцев. Однако для глины на рис. 3б в момент времени 14 месяцев толщина ЛПО начинает убывать, что связано с тем, что к этому моменту на глубине данного слоя пород осуществлена выемка породы в месте строящегося ствола.

Основным преимуществом предложенного критерия P является интегральный учет прочностных и деформационных свойств по всей толщине ЛПО. Это позволяет с использованием одного параметра оценить как толщину зоны отрицательных температур, так и неоднородное распределение температур и прочностных свойств в области замороженных пород.

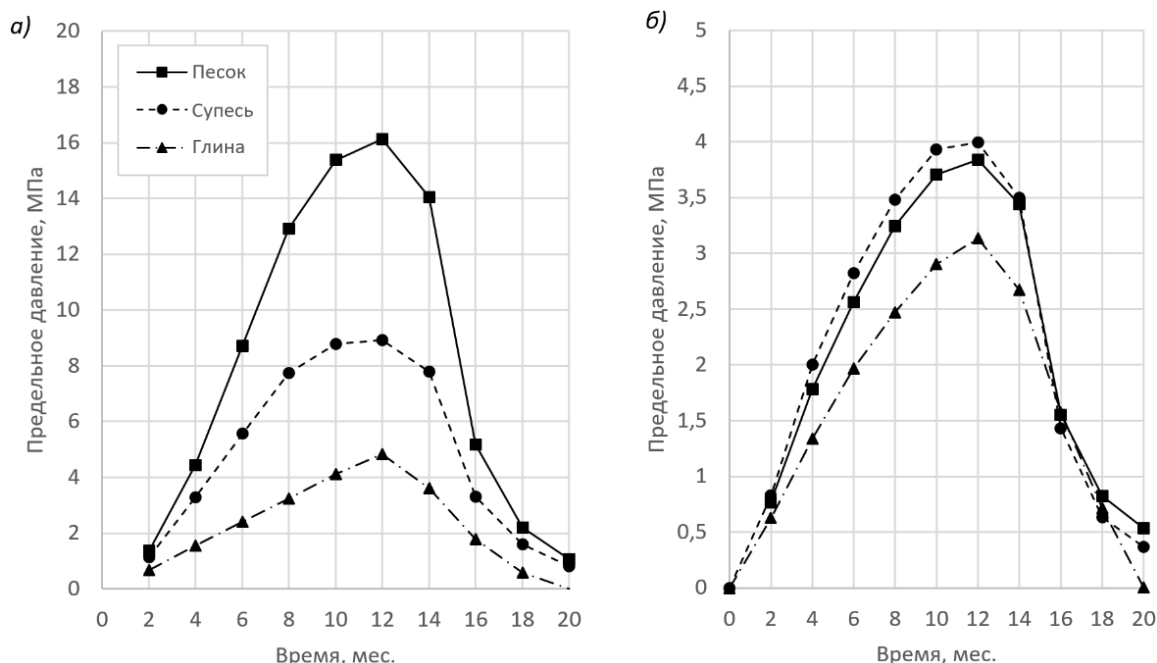


Рис. 5. Временные зависимости предельной нагрузки, которую способно выдержать ЛПО, а) – формула (4), б) – формула (5)

Формулы (4) и (5) позволяют оценить величину P в рамках условия предельного напряженного состояния ЛПО. По аналогии с этим условием в работе введена также предельная несущая способность ЛПО P^* (Па) по условию предельного деформированного состояния (предельно допустимых перемещений внутренней стенки ЛПО до возведения крепи):

$$P^* = \frac{1}{h(1-\zeta)} \int_a^b A(r) \left(\frac{au_a}{rh} \right)^m dr. \quad (6)$$

Здесь A – модуль нелинейной деформации, Па; m – показатель нелинейности зависимости напряжений от деформаций; $0 \leq \zeta < 1$ – параметр, характеризующий тип защемления торцов незакрепленного участка ЛПО. Из рассчитанных по формулам (4) – (6) несущих способностей выбирается минимальная величина, которая затем сравнивается с фактической нагрузкой на внешнюю стенку ЛПО, определенную для заданной глубины замораживаемого слоя пород исходя из суммы горного и гидростатического давлений.

По результатам исследований, описанных в главе 4, сформулировано **II научное положение**:

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 зависимостью прочности пород от температуры.

В главе 5 работы с учетом полученных ранее выводов формулируются новые принципы и способ управления «по требованию» искусственным замораживанием пород и грунтов в процессе строительства шахтных стволов калийных рудников.

Отмечено, что важным и не рассмотренным ранее в литературе аспектом систем замораживания является реагирование систем замораживания на возможные непредвиденные ситуации, возникающие непосредственно в ходе искусственного замораживания пород. Примером такой ситуации был выявленный факт фильтрационного потока подземных вод в одном из слоев пород в интервале замораживания при строительстве шахтного ствола Дарасинского рудника. Другими примерами непредвиденных событий являются аварийные отключения замораживающих колонок, связанные, к примеру, с их разрывом. В данном случае обычно требуется производить корректировку параметров работы замораживающей станции, либо изменять технологические параметры проходки ствола.

Введены три основные стратегии замораживания «по требованию», ранжированные по степени их сложности – от наиболее простой к наиболее сложной:

1. Мониторинг основных параметров породного массива и системы замораживания.
2. Дистанционное управление системой замораживания.
3. Реагирование на возможные непредвиденные события.

Реализация всех трех стратегий наиболее сложна и, вероятно, не всегда целесообразна на практике, поскольку сложность системы управления должна быть соразмерна сложности исследуемого объекта. Выбор стратегии определяется исходя из особенностей каждого конкретного практического случая.

Введен принцип системы замораживания «по требованию», следующий из ее названия: *рассмотрение интервала замораживания не как единого целого, а как совокупности отдельных слоев пород*, каждый из которых требует отведения различного количества теплоты для достижения требуемых толщин ЛПО. В этом случае меняется подход к определению времени начала проходки ствола. В качестве такого времени должно выбираться не время достижения требуемых толщин во всем интервале замораживания, а время достижения требуемых толщин ЛПО в верхних слоях пород, которое обычно меньше, чем для более глубоких слоев пород. При этом, в ходе дальнейшей углубки шахтного ствола ЛПО продолжит расти. Проходка шахтного

ствола буровзрывным способом в интервале замораживания пород обычно является более длительной процедурой, чем формирование ЛПО, а потому можно заключить, что толщины ЛПО более глубоких слоев пород достигнут своих проектных значений к моменту начала работ по выемке породы соответствующих слоев. Однако крайне важным здесь является экспериментальный контроль и опережающее моделирование достижения требуемых толщин ЛПО к моменту начала работ по выемке породы на данном слое, так как всегда есть риск возникновения непредвиденных ситуаций в процессе замораживания пород (см. рис. 6).

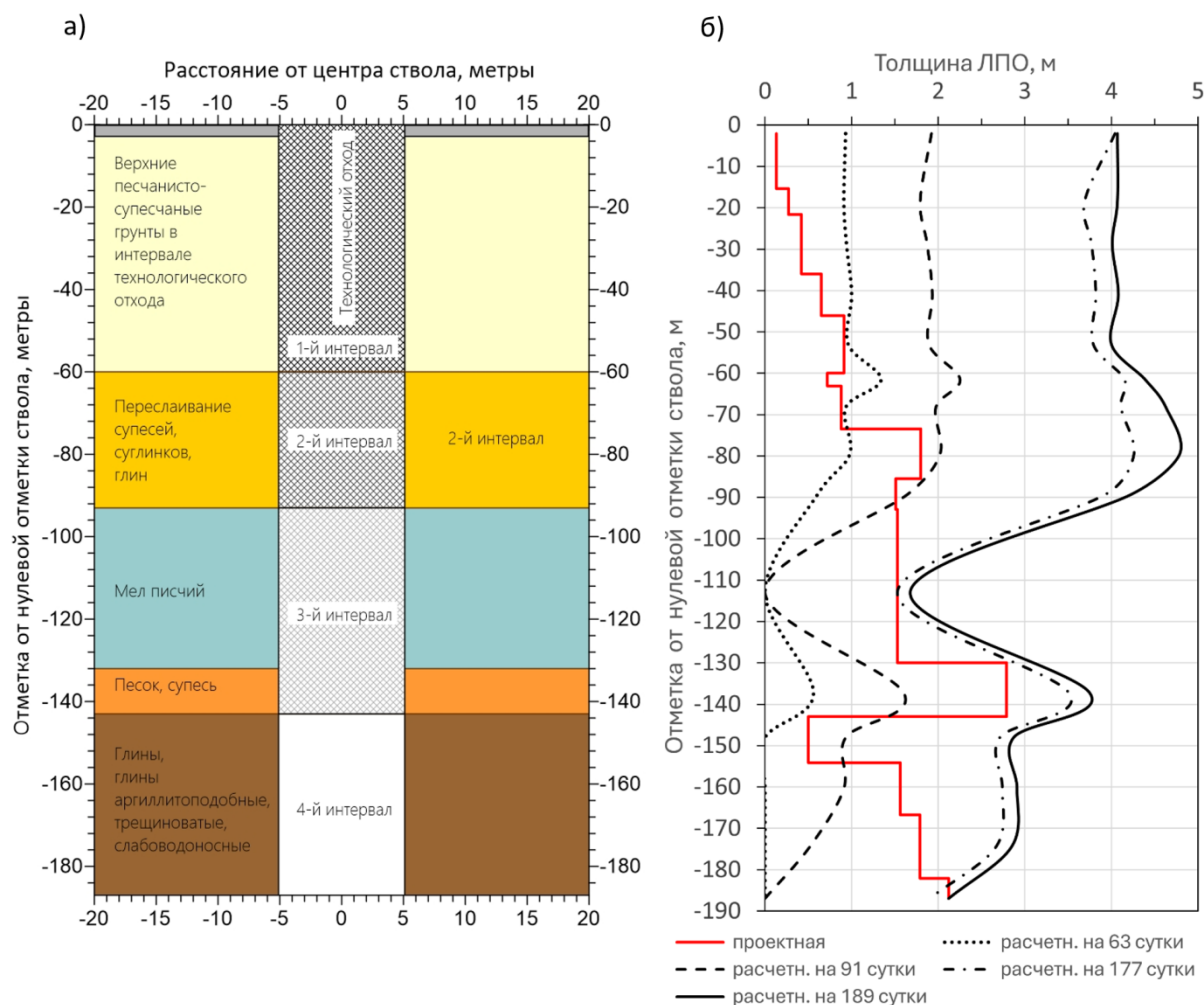


Рис. 6. Дифференцированное рассмотрение интервала замораживания (а) и временная динамика глубинного распределения толщин ЛПО, построенная по данным наблюдений (б)

Предложенный принцип дифференцированного рассмотрения интервала замораживания будет играть важную роль в случае больших интервалов замораживания (200 м и более), когда выемка пород на всём интервале замораживания сопоставима или превышает характерное время формирования замкнутого ЛПО требуемой толщины в наиболее глубоких слоях пород из интервала замораживания.

Параметры работы системы замораживания находятся в неразрывной связи с технологическими параметрами ведения горных работ – это следует хотя бы из вида формул (5) и (6), определяющих требуемую по критерию безопасности толщину ЛПО. Оптимизируя одни параметры важно не ухудшить значения других, так как это может привести к увеличению суммарных финансовых затрат на строительство ствола. По данной причине замораживание *«по требованию»* имеет своей целью минимизировать затраты на установку и работу системы замораживания вкупе с затратами на проходку ствола в интервале замораживания при условии обеспечения безопасности ведения горных работ – требуемых толщин ЛПО. Это еще один введенный нами принцип замораживания «по требованию».

Введенные принципы, составляющие основу предложенного способа замораживания «по требованию», применены на практике при проходке двух шахтных стволов строящегося Дарасинского рудника в республике Беларусь. Термометрический контроль искусственного замораживания на строящемся руднике проводился с использованием распределенных измерений температур в восьми КТ скважинах – по четыре на каждом стволе. Измерительное, серверное и сетевое оборудование размещалось в пределах промплощадки рудника. Данные непрерывных измерений температуры пород, а также характеристик циркулирующего рассола накапливались в единой базе данных и использовались для уточнения параметров теплофизических моделей замораживаемого массива для каждого из стволов. Параметризованные теплофизические модели многослойного породного массива позволяли восстановить временную динамику поля температур во всем замораживаемом объеме пород, оценить фактические и прогнозные параметры ЛПО.

Согласно данным моделирования, требуемые толшины ЛПО достигались во всех слоях пород в интервале замораживания в течение 170 суток с момента начала активного замораживания. При этом по данным прогнозного математического моделирования получено, что через 30 суток ЛПО достигнет минимально требуемой толщины во всех слоях в интервале глубин 0,0–85,5 м; через 60 суток – во интервале 0,0–92,9 м, через 170 суток – во всех слоях в интервале замораживания горных пород. Ввиду этого факта, при принятии решения о начале проходки шахтных стволов использовался принцип дифференцированного рассмотрения интервала замораживания, который был ранее также внесен во внутреннюю нормативную инструкцию.

Проходка клетьевого ствола буровзрывным способом была начата 18.12.2020 г. При этом достижение требуемых толщин ЛПО во всем интервале замораживания было

осуществлено позднее (09.03.2021 г.), после чего замораживающие станции клетового ствола были переведены в режим пассивного замораживания с отключением одного из блоков замораживающей станции.

Проходка скипового ствола также буровзрывным способом была начата 20.03.2021 г. К данному моменту толщина ЛПО достигла требуемых толщин в интервале глубин 0,0-90,1 м. Требуемые толщины ЛПО во всем интервале замораживания на скиповом стволе были достигнуты после применения комплекса мероприятий в связи с особенностью процесса замораживания в интервале глубин 133,7-141,5 м, на котором в ходе натурного мониторинга было выявлено движение подземных вод в порово-трещинном пространстве породного массива. Комплекс мероприятий включал в себя: бурение опережающих шпуров с забоя вниз на глубину 6,0 м, осмотр их на предмет наличия водопроявления; увеличение толщину раскоски (зоны отступа от оконтуривающих шпуров при буровзрывных работах до стенки ствола, которая разрабатывается отбойными молотками); уменьшение высоты заходки в интервале глубин 133,7-141,5 м до величины 2,5 м. Разработка этого комплекса мероприятий производилась, в частности, на основании прогнозных расчетов несущей способности ЛПО, выполненной на модификации описанной ранее математической модели, в которой был учтен конвективный перенос теплоты из-за фильтрации поровых вод.

В целом в результате реализации системы управления замораживанием «по требованию» экономия электроэнергии на работу замораживающей станции на формирование ЛПО двух стволов составила более 3 млн. кВт*ч. Данная экономия рассчитана с учетом двух факторов: 1) более раннего начала проходки стволов при переходе на пассивное замораживание и 2) более раннего отключения замораживающей станции при переходе на стадию размораживания.

Проведенные и описанные в **главе 5** исследования легли в основу **III научного положения**, выносимого на защиту:

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.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ,
опубликованных автором по теме диссертации**

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

1. 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.
2. 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.
3. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of Temperature Anomalies during Thermal Monitoring of Frozen Wall Formation // Fluids. – 2021. – Т. 6. – Статья № 297.
4. 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.
5. 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.
6. 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. 34-49.
7. Семин М. А., Головатый И. И., Левин Л. Ю., Богомягков А. В. Разработка критерия оценки несущей способности ледопородного ограждения по данным температурного мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 111–125.
8. 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.

прочие публикации

9. Витязь П.А., Головатый И.И., Прушак В.Я., Диулин Д.А. Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов Петриковского ГОКа // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 366-377.

10. 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.

патенты

11. Патент № 038447 (ЕАПО). Скважинный оптоволоконный датчик непрерывного контроля температуры / Головатый И.И., Барбиков Д.В., Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А., Дьяконов А.С.; заявитель и патентообладатель: ОАО «Беларуськалий», ПФИЦ УрО РАН. — № 2019000097; заявл. 06.09.2019; опубл. 30.08.2021, Бюллетень № 8. — 4 с.
12. 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.

Сдано в печать 5 августа 2025 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а