

На правах рукописи



Бублик Сергей Анатольевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОГО
ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПЕРЕНОСА МИНЕРАЛИЗОВАННОЙ
ВЛАГИ

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2026

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

Научный руководитель: **Семи́н Михаи́л Алекса́ндрович**
доктор технических наук,
заведующий лабораторией математического моделирования
геотехнических процессов «ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **Плешко Михаил Степанович**
доктор технических наук, профессор кафедры строительства
подземных сооружений и горных предприятий Федерального
государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС» (г. Москва)

Тарасов Владислав Викторович
кандидат технических наук, заведующий научно-
исследовательской лабораторией строительства и
эксплуатации шахтных стволов АО «ВНИИ Галургии» (г.
Пермь)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «**Тульский
государственный университет**» (г. Тула)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2026 года в __:__ 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»: <https://permisc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 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 адрес
электронной почты лица, представившего отзыв.

Отзывы необходимо отправлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-
А. Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02. Электронная почта: lserg@mi-perm.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук



С.Ю. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Строительство шахтных стволов и тоннелей метрополитенов в условиях водонасыщенных и неустойчивых пород осуществляется с использованием специальных способов. Одним из наиболее распространенных специальных способов является искусственное замораживание пород. Цель искусственного замораживания пород заключается в возведении вокруг будущего подземного сооружения защитной конструкции из замороженных пород — ледопородного ограждения (ЛПО). Функции ЛПО заключаются в недопущении затопления подземного сооружения подземными водами и укрепления стенок сооружения до возведения постоянной крепи. Технически замораживание пород осуществляется с помощью замораживающих скважин, пробуренных по периметру проектируемого подземного сооружения.

Исследованием замороженных пород занимались многие ученые, из которых наибольший вклад в изучение данного вопроса внесли Н.А. Цытович, С.С. Вялов, Н.С. Иванов, А.Г. Бровка, А.С. Курилко, Ф.Э. Арэ, О.В. Andersland, F.H. Sayles, T. Wang и др. Отдельно вопросом протекания теплофизических процессов в породах при возведении ЛПО занимались Н.Г. Трупак, А.З. Литвин, И.Д. Насонов, Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков, М.С. Желнин, М.А. Alzoubi, О.В. Andersland, D.S. Calderón, W. Long, A.F. Zueter, H. Tounsi и др.

Однако большая часть работ, посвященных исследованию и проектированию ЛПО, зачастую не затрагивают вопросов наличия солей в поровой влаге. Данная особенность наиболее выражена для надсолевых толщ вблизи контакта с водозащитной толщей на калийных и соляных месторождениях. Присутствие растворенной соли в замораживаемой породе замедляет фазовый переход поровой воды в лед. За счет смещения фазового перехода в область более низких температур, порода будет охлаждаться немного быстрее по сравнению с ситуацией без соли. При этом содержание незамороженной воды будет стремительно увеличиваться с ростом начального содержания растворенной соли в поровой влаге. С учетом того, что наличие незамороженной воды в породе сильно влияет на ее прочностные свойства, увеличение содержания солей в замораживаемых породах приведет к ухудшению несущей способности ЛПО.

Исследованиями влияния содержания солей в поровой влаге на свойства пород занимались Н.Г. Трупак, В.И. Аксенов, А.В. Брушков, В.Т. Трофимов, П.Е. Пучков, А.З. Литвин, T. Lucas, K.-Q. Li, Z. Xiao и др. Однако, данные исследования основаны на малом количестве эмпирических данных и зачастую пригодны лишь к задачам мерзлотоведения. По этой причине, на сегодняшний день остаются не до конца изученными вопросы, связанные с влиянием типа и количества растворенных солей на теплофизические и прочностные свойства пород, характерные для месторождений солей. Кроме того, существующие математические модели искусственного замораживания засоленных пород зачастую слишком комплексны и пригодны только

для исследований образцов пород, замораживаемых в лабораторных условиях. При этом многие упрощенные модели замораживания засоленных пород не пригодны для моделирования формирования ЛПО.

Вышеперечисленные обстоятельства указывают на актуальность проведения экспериментальных исследований влияния содержания солей в поровой влаге на свойства замораживаемых пород, разработку математической модели искусственного замораживания засоленных пород в шахтных условиях и оценки влияния содержания солей в поровой влаге на формирование и прочность ЛПО для повышения эффективности строительства шахтных стволов и безопасности ведения горных работ.

Цель работы

Разработать и обосновать методику расчета технологических параметров искусственного замораживания влажных засоленных пород для обеспечения безопасности проходки шахтных стволов в сложных гидрохимических и гидрогеологических условиях.

Основная идея состоит в расчете формирования ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов в породах, содержащих минерализованную влагу, основанном на математической модели, учитывающей изменение содержания незамороженной воды и снижение гидравлической проницаемости при замораживании влажного засоленного массива.

Основные задачи работы

1. Провести комплексные экспериментальные исследования влияния засоленности поровой влаги на теплофизические и прочностные свойства пород; получить эмпирические зависимости свойств пород различного типа от температуры и содержания растворенной соли.
2. Разработать математическую модель тепло- и массопереноса в системе «замораживающие колонки — порода» и параметризовать ее по данным экспериментальных исследований.
3. Провести многопараметрическое моделирование процесса искусственного замораживания влажных засоленных пород при проходке шахтного ствола и проанализировать влияние засоленности поровой влаги на распределение температуры в различных породах и основные параметры ледопородного ограждения.
4. Разработать расчетный метод, позволяющий оперативно оценить влияние переноса влаги на формирование ледопородного ограждения.
5. Разработать методику расчета технологических параметров искусственного замораживания пород с учетом засоленности поровой влаги и ее переноса.

Методы исследований основаны на структурно-системном подходе к решению поставленных задач, включают в себя анализ и обобщение научного и практического опыта, экспериментальные исследования зависимости теплофизических и прочностных свойств замораживаемых пород от температуры и концентрации растворимых солей, обработку экспериментальных данных, теоретический анализ закономерностей протекания теплофизических процессов в замораживаемых засоленных породах, формулирование математической модели поведения пород, содержащих растворенные соли, при их замораживании, ее алгоритмизация и численное компьютерное моделирование, анализ результатов численного моделирования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости свойств влажных засоленных пород различного типа от температуры, построенные по результатам лабораторных экспериментов, позволяют повысить точность моделирования искусственного замораживания пород и прогнозировать влияние минерализации поровой влаги на несущую способность ледопородного ограждения.
2. Математическая модель тепло- и массопереноса во влажном засоленном породном массиве, учитывающая влияние температуры и наличия растворенной соли на содержание незамороженной воды и относительную гидравлическую проницаемость, позволяет описывать нестационарное изменение температурного поля, пространственную неоднородность распределения влажности и содержания соли в процессе формирования и поддержания ледопородного ограждения.
3. Методика расчета искусственного замораживания влажных засоленных пород, основанная на полученных зависимостях основных параметров ледопородного ограждения от содержания соли в породах различного типа, позволяет повысить безопасность проходки стволов в сложных гидрохимических и гидрогеологических условиях.

Научная новизна

1. Получены эмпирические зависимости теплофизических и прочностных свойств во влагонасыщенных образцах глины, мела и песка от содержания растворенной соли и температуры на основе проведенных лабораторных исследований.
2. Определены характерные особенности формирования морозного пучения во влагонасыщенных образцах глины, мела и глинистого песка при наличии в них различного содержания соли.
3. Разработана математическая модель нестационарных тепло- и массообменных процессов в системе «замораживающие колонки – порода», учитывающая влияние засоленности и переноса поровой влаги на замораживание пород.

4. Разработана методика оперативного расчета плоско-параллельной фильтрации поровой влаги, учитывающая обтекание влаги вокруг замораживающих колонок и сомкнутого ледопородного ограждения.
5. Разработана методика расчета технологических параметров искусственного замораживания пород с учетом засоленности поровой влаги.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов численного моделирования и натурных измерений, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами, экспериментальными исследованиями в натуральных условиях.

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты могут использоваться при проектировании замораживания влажных засоленных пород. Разработанная методика расчета технологических параметров искусственного замораживания позволит повысить точность и надежность принимаемых проектных параметров ЛПО и параметров системы замораживания. Благодаря предложенным и описанным в работе подходам будет повышена безопасность ведения горных работ при строительстве шахтных стволов во влажных засоленных породах.

Разработанная математическая модель в настоящий момент внедрена в программу FrozenWall, используемую в практике искусственного замораживания пород для мониторинга и контроля состояния ЛПО.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований ПФИЦ УрО РАН, проводившихся в период 2022–2025 гг. по теме «Комплексное моделирование геофизических, геомеханических и аэрологических процессов в горнотехнических системах» (регистрационный номер НИОКТР: 122030100425-6), с тематикой хоздоговорных работ между ПФИЦ УрО РАН и ОАО «Беларуськалий», ОАО «Белгорхимпром».

Также исследования по теме работы были поддержаны и частично финансировались 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», Российским научным фондом по проекту № 19-77-30008 «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов», Министерством науки и высшего образования Российской

Федерации в рамках крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024 г).

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на VI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-корр. РАН Новопашина М.Д. «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, 2021 г.), ежегодной научной сессии «ГИ УрО РАН» (г. Пермь, 2023 г.), XXIII зимней школе по механике сплошных сред ИМСС (г. Пермь, 2023 г.), XXIV зимней школе по механике сплошных сред ИМСС (г. Пермь, 2025 г.), семинаре в рамках научного проекта Международных исследовательских групп по теме «Исследование влияния миграции минерализованных подземных вод на формирование и механические характеристики ледопородных ограждений строящихся горных выработок» (г. Пермь, 2023 г.).

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, анализ и обработка результатов экспериментальных исследований в лабораторных условиях, постановка математической модели, настройка ее параметров, валидация и проведение численных экспериментов, обработка и анализ полученных результатов.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук Семинову М.А. за формирование научного направления работы, ценные указания и создание уникальной рабочей среды, к.ф.-м.н. Пугину А.В. за ценные указания, д-р техн. наук, доценту Бровке Г.П. за помощь в подготовке экспериментальных исследований.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 9 публикаций в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации; получен один патент.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 19 таблиц. Список использованных источников состоит из 152 наименования, в том числе 111 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение:

Зависимости свойств влажных засоленных пород различного типа от температуры, построенные по результатам лабораторных экспериментов, позволяют повысить точность моделирования искусственного замораживания пород и прогнозировать влияние минерализации поровой влаги на несущую способность ледопородного ограждения.

Для выявления характерных особенностей протекания теплофизических процессов в породах, а также для последующей оценки их несущей способности при замораживании были проведены лабораторные исследования, направленные на установление зависимости теплофизических и механических свойств пород от температуры и содержания соли в поровой влаге.

В качестве исследуемых горных пород выбраны различные типы, характерные для интервалов замораживания при проходке стволов калийных рудников: глина, мел и песок. В качестве соли выбран NaCl, часто встречающийся в наибольшей концентрации в поровой влаге водоносных горизонтов калийных рудников. Материал для образцов был получен с интервала замораживания скипового ствола Дарасинского рудника ОАО «Беларуськалий».

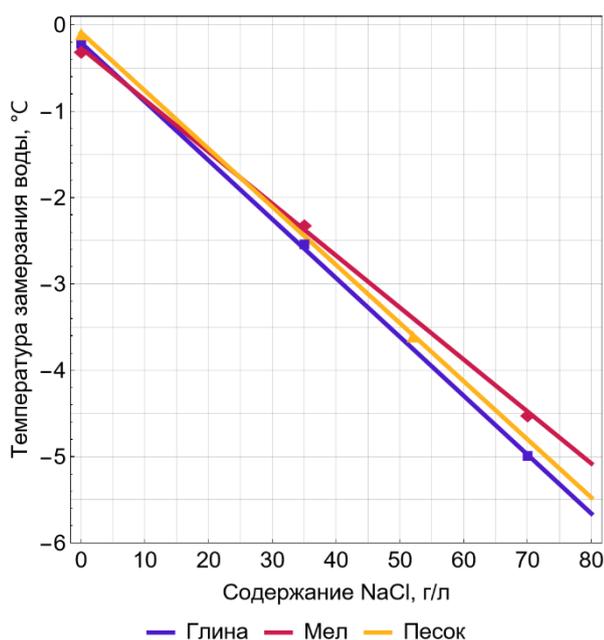


Рисунок 1 — Зависимость температуры замораживания воды от содержания соли (точки — экспериментальные замеры, линии — аппроксимация)

Экспериментальные исследования включали в себя определение зависимостей от содержания NaCl в поровой влаге для следующих теплофизических свойств пород: температура начала заморзания воды (далее температура заморзания воды), содержание незамороженной воды и теплопроводность пород. Экспериментальные зависимости температуры заморзания воды были аппроксимированы линейной зависимостью (см. рисунок 1).

Теоретическая интерпретация экспериментальных данных содержания незамороженной воды проводилась с помощью модели ван Генухтена-Муалема:

$$\gamma = \gamma_{res} + (1 - \gamma_{res}) \left[1 + \left(\frac{T_l - T}{\omega} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m}, \quad (1)$$

где γ — содержание незамороженной воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$; γ_{res} — остаточное содержание незамороженной воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$; T — температура влажной породы, $^{\circ}\text{C}$; T_i — температура замерзания воды, $^{\circ}\text{C}$; ω , m — материальные константы (определяются экспериментально).

Для теоретической интерпретации теплопроводности использовалась модифицированная степенная модель:

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \lambda_l^{\xi n \gamma} \lambda_i^{\xi n (1-\gamma)}, \quad (2)$$

где λ — теплопроводность влажной породы, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; n — пористость влажной породы, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ξ — поправочный коэффициент; индекс «s» соответствует сухим частицам породы, индекс «l» — жидкой фазе, а индекс «i» — льду. Предложенная модификация в виде поправочного коэффициента ξ необходима для учета изменения пористости, а также переноса и перераспределения влаги в породах при их замораживании.

Полученные экспериментальные и аппроксимирующие зависимости содержания незамороженной воды и теплопроводности представлены на рисунке 2. Из полученных результатов можно наблюдать хорошее соответствие между экспериментальными данными и их теоретической аппроксимацией.

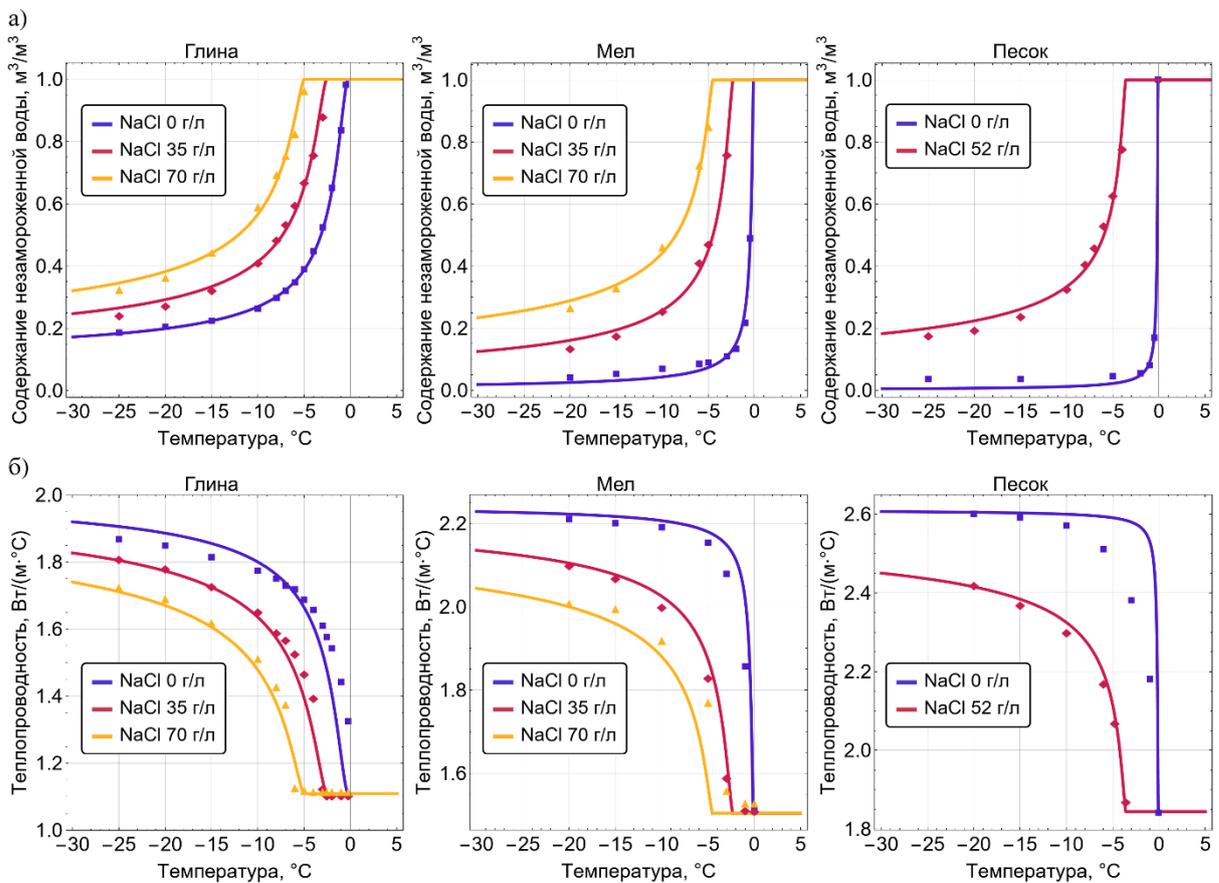


Рисунок 1 — Зависимость содержания незамороженной воды (а), теплопроводности (б) и удельной теплоемкости (в) от температуры и содержания NaCl для исследуемых пород (точки — экспериментальные данные, линии — аппроксимация)

Исследование механических свойств пород включало в себя определение зависимости длительной прочности пород при одноосном сжатии от содержания различных солей. Из полученных результатов установлен важный вывод о том, что длительная прочность замороженных пород определяется в основном содержанием незамороженной воды (зависимость от растворенной соли реализуется опосредованно, через ее влияние на содержание незамороженной воды). Анализ экспериментальных данных показал, что данная зависимость подчиняется степенному закону вида:

$$\sigma_c = a\gamma^b, \quad (3)$$

где σ_c — длительная прочность породы на сжатие, Па; a , b — материальные константы (определяются экспериментально). Полученные экспериментальные и аппроксимирующие зависимости представлены на рисунке 3.

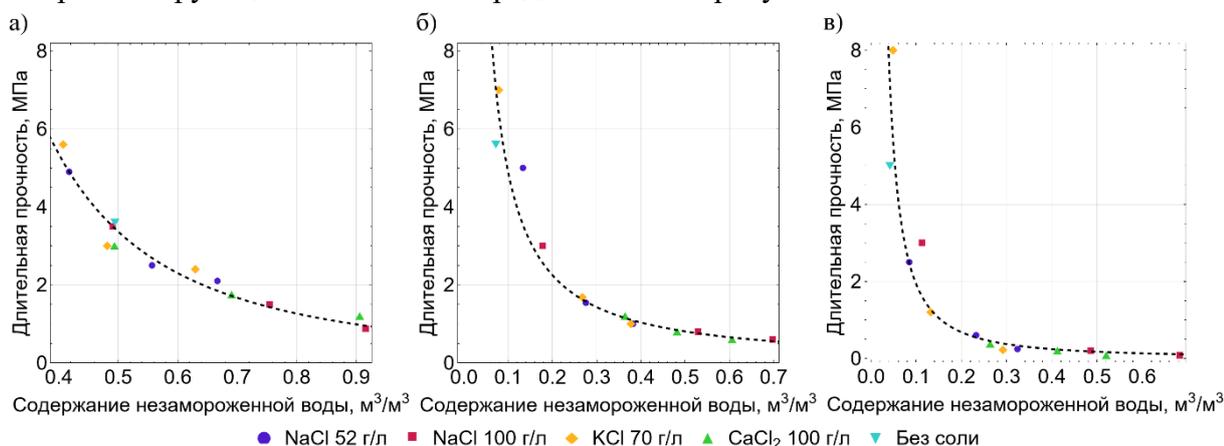


Рисунок 3 — Зависимости длительной прочности на одноосное сжатие от содержания незамороженной воды: глина (а); мел (б); песок (в) (точки — экспериментальные данные, линии — аппроксимация)

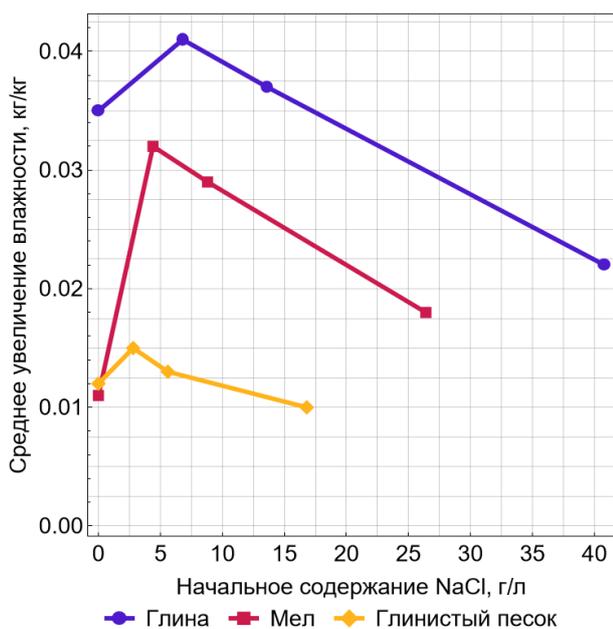


Рисунок 4 — Среднее увеличение влажности мерзлой зоны по сравнению с исходной влажностью

Помимо измерения измерения теплофизических и механических свойств пород, было экспериментально изучено влияние соли на морозное пучение, проявляющееся в переносе влаги к фронту замораживания. В качестве исследованных пород рассматривались глина, мел и глинистый песок, а в качестве соли рассмотрен NaCl.

Наличие соли в поровой влаге оказывает значительное влияние на морозное пучение. При начальном содержании соли выше 3,5 г/л среднее увеличение влажности мерзлой зоны уменьшается. Однако при меньших значениях содержания соли наблюдается обратный процесс (см. рисунок 4).

Качественный анализ уравнения Дарси и уравнения Клаузиуса-Клайперона показал, что основная причина увеличения влаги в мерзлой зоне при содержании соли ниже 3,5 г/л — рост относительной гидравлической проницаемости пород, вызванный увеличением количества незамороженной воды с ростом содержания соли.

II научное положение

Математическая модель тепло- и массопереноса во влажном засоленном породном массиве, учитывающая влияние температуры и наличия растворенной соли на содержание незамороженной воды и относительную гидравлическую проницаемость, позволяет описывать нестационарное изменение температурного поля, пространственную неоднородность распределения влажности и содержания соли в процессе формирования и поддержания ледопородного ограждения.

Для оценки влияния содержания солей и переноса влаги на тепло-массообменные процессы в искусственно замораживаемых породах была разработана математическая модель тепло- и массопереноса при формировании ЛПО. Данная модель строилась на основе следующих допущений:

- принималось допущение о локальном термодинамическом равновесии твердой и жидкой фаз в каждой точке среды;
- отдельные слои пород принимались достаточно протяженными в вертикальном направлении, что позволяло пренебречь вертикальным теплопереносом в срединных горизонтальных разрезах этих слоев;
- породы принимались полностью насыщенными влагой, а теплофизические свойства твердой и жидкой фаз принимались однородными и изотропными;
- учитывалась сжимаемость пород за счет изменения пористости;
- передача теплоты происходит за счет тепловой диффузии и переноса поровой влаги;
- влага переносится за счет внешнего градиента давления и сил морозного пучения;
- жидкость в породах несжимаемая;
- учитывались процессы теплопередачи между породным массивом и замораживающими колонками;
- выделение скрытой теплоты принималось как вследствие фазового превращения воды в лед, так и по причине выпадения соли в осадок;
- эффект переохлаждения поровой влаги не рассматривался.

Ввиду всех принятых модельных допущений можно сказать, что тепло- и массообменные процессы протекают преимущественно в горизонтальной плоскости. По этим причинам рассматриваемую задачу для каждого отдельного слоя пород можно свести к двумерной постановке. В этом случае тепло- и массоперенос описывается уравнениями баланса энергии и массы в следующем виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_l L_m \frac{\partial(w\gamma)}{\partial t} - \rho_s L_s \frac{\partial(w\gamma s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l c_l \mathbf{v} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (4)$$

$$[\rho_s - \rho_l \gamma - \rho_i (1 - \gamma)] \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho_l n) = \nabla \cdot (D_n \nabla n), \quad (5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{s_0}{\gamma^2} \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \nabla \cdot (D_s \nabla s), \quad (6)$$

где ρ , ρ_s , ρ_l , ρ_i — плотности влажной породы, соли, жидкой фазы и льда, соответственно, кг/м³; c , c_l — удельные теплоемкости влажной породы и жидкой фазы, Дж/(кг·°C); T — температура породы, °C; t — время, с; L_m , L_s — удельные теплоты фазового перехода влаги и соли, соответственно, Дж/кг; n — пористость породы, м³/м³; w — влагосодержание в породе, кг/кг; γ — содержание незамерзшей воды, м³/м³; s — содержание (концентрация) соли в поровой влаге, кг/кг; s_0 — начальное содержание соли в поровой влаге, кг/кг; \mathbf{v} — вектор скорости переноса влаги, м/с; λ — теплопроводность влажной породы, Вт/(м·°C); D_n , D_s — коэффициенты распучивания породы и диффузии соли, соответственно, м²/с. Следует отметить, что величина D_n характеризует процесс распучивания и перераспределения механических напряжений в породе, подверженной морозному пучению.

Расчет переноса поровой влаги учитывал две компоненты: фильтрацию, вызванную градиентом напора, и перенос, обусловленный силами морозного пучения:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_h + \mathbf{v}_f, \quad (7)$$

где \mathbf{v}_h , \mathbf{v}_f — вектора скорости переноса влаги под действием градиента напора и сил морозного пучения, соответственно, соответственно, м/с;

Компонента \mathbf{v}_f в уравнении (8) рассчитывалась численно из уравнения Дарси и уравнения Клазиуса-Клапейрона. Компоненту \mathbf{v}_h можно рассчитать численно из уравнения Дарси и условия несжимаемости. Однако численный расчет \mathbf{v}_h на каждой временной итерации является довольно трудозатратным в вычислительном плане. В этом смысле представляет интерес поиск различных упрощенных аналитических подходов с целью минимизации вычислительных затрат и сохранения приемлемой точности результатов расчетов. Таким образом, в рамках данной работы были разработаны два метода оперативного расчета фильтрации поровой влаги под действием градиента напора: коэффициентный метод и метод функций тока. Первый метод строится на предположении, что скорость фильтрации в элементарном объеме зависит лишь от содержания льда в данном объеме. Второй метод выводится на основе построения функций тока из классической теории аналитического расчета обтекания потоком кругового цилиндра.

Для замыкания системы уравнений (5)–(7) введены начальные и граничные условия:

$$T|_{t=0} = T_0, n|_{t=0} = n_0, \theta_s|_{t=0} = \theta_{s0}, \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{in}} = 0, \frac{\partial n}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{in}} = 0, \frac{\partial \theta_s}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{in}} = 0, p_h|_{\Omega_{in}} = p_{in}, \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{out}} = 0, \frac{\partial n}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{out}} = 0, \frac{\partial \theta_s}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{out}} = 0, p_h|_{\Omega_{out}} = p_{out}, \quad (10)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_e} = 0, \frac{\partial n}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_e} = 0, \frac{\partial \theta_s}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_e} = 0, \frac{\partial p_h}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_e} = 0, \quad (11)$$

$$\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha_{fb} (T - T_{fb}) \right) \Big|_{\Omega_{fb}} = 0, \frac{\partial n}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{fb}} = 0, \frac{\partial \theta_s}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial p_h}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Omega_{fb}} = 0,$$

где T_0 , T_{fb} — начальная температура породы и температура хладонителя в замораживающей колонке, соответственно, °C; n_0 — начальная пористость породы; \mathbf{n} — вектор нормали к границе, м; p_{in} , p_{out} — давление влаги на входе и на выходе в расчетную область, соответственно, Па; α_{fb} — коэффициент теплоотдачи между породным массивом и замораживающей колонкой, Вт/(м²·°C); Ω_{in} , Ω_{out} , Ω_e , Ω_{fb} — границы входа в расчетную область, выхода из расчетной области, внешней и замораживающих колонок, соответственно.

Для численной дискретизации уравнений (5)–(13) по пространству применялся метод конечных объемов, для дискретизации по времени — неявная схема Эйлера. Реализация численных алгоритмов, построение геометрий и вычислительных сеток выполнены в рамках программы TES, разработанной в «Горном институте УрО РАН».

Разработанная математическая модель прошла валидацию по данным мониторинга температуры при замораживании пород в лабораторных и натуральных условиях. Разработанная модель была также сравнена с моделью в программе FrozenWall для условий замораживания скипового ствола Талицкого горно-обогатительного комплекса. В данном случае две модели сравнивались по критерию необходимости в дополнительных калибровках параметров модели в процессе расчета для обеспечения разницы результатов моделирования и данных натурального мониторинга не выше 1 °C. По результатам сравнения установлено, что для разработанной модели, в отличие от модели во FrozenWall, не требуются калибровки параметров в процессе расчета на длительном сроке замораживания, охватывающего как активный, так и пассивный периоды замораживания.

С помощью разработанной математической модели проведено численное моделирование замораживания пород и формирования ЛПО при различном начальном содержании соли (NaCl) в поровой влаге. Моделируемые типы пород, их теплофизические и прочностные свойства такие же, как были рассмотрены ранее.

Условия замораживания задавались аналогично тем, что были приняты для скипового ствола Дарасинского рудника.

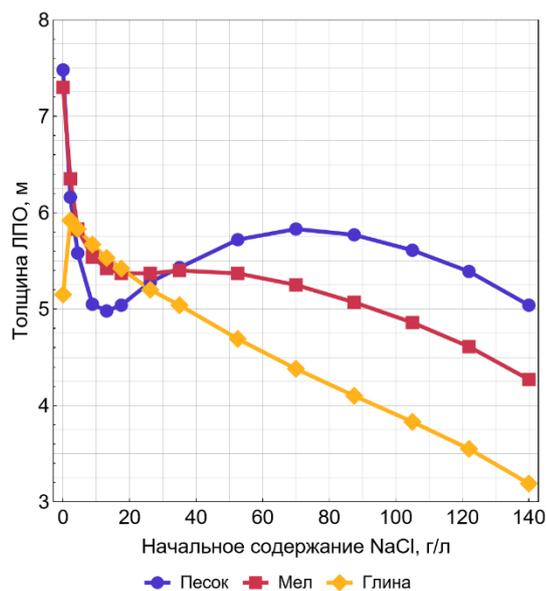


Рисунок 5 — Зависимость толщины ЛПО от начального содержания NaCl для момента времени 180 суток

Из результатов моделирования установлены закономерности изменения толщины ЛПО от начального содержания NaCl. Границы ЛПО рассчитывались по изотерме начала замерзания воды. Из рисунка 5 видно, что для глины характерен резкий скачок толщины ЛПО около нулевых содержаний NaCl, однако при дальнейшем увеличении засоленности толщина ЛПО снижается по закону, близкому к линейному. У песка можно наблюдать области локального минимума и локального максимума толщины ЛПО, а для мела характерна область, в которой толщина ЛПО практически не меняется.

Полученные зависимости толщины ЛПО от начального содержания NaCl можно объяснить двумя разнонаправленными факторами: 1) снижение температуры замерзания воды при увеличении содержания NaCl; 2) снижение температуры породы с увеличением начального содержания NaCl. Первый фактор способствует уменьшению толщины ЛПО за счет того, что смещаются границы ЛПО в сторону меньших температур. Второй фактор напротив способствует увеличению толщины ЛПО в силу более низких температур породы. Таким образом, в случае глины первый фактор превалирует во всем диапазоне содержания NaCl, за исключением области очень малой засоленности. Однако у песка присутствует диапазон начального содержания NaCl (от 17 г/л до 70 г/л) при котором выраженный перевес второго фактора, а потому можно наблюдать увеличение толщины ЛПО. В случае мела присутствует диапазон содержания NaCl (от 17 г/л до 52 г/л), при котором оба фактора уравниваются, и содержание соли не влияет на толщину ЛПО. При этом дальнейшее увеличение начального содержания NaCl приводит к превалированию первого фактора и для всех пород можно наблюдать монотонное снижение толщины ЛПО при содержаниях NaCl выше 70 г/л.

Расчитанная толщина ЛПО использовалась для оценки зависимости несущей способности ЛПО при увеличении начального содержания NaCl. Расчет несущей способности ЛПО проводился в терминах предельной нагрузки на боковую стенку ЛПО с использованием критериальной зависимости вида:

$$P = \frac{\langle \sigma_c \rangle E}{\xi h}, \quad (13)$$

где P — предельная несущая способность ЛПО, Па; $\langle \sigma_c \rangle$ — средняя длительная прочность в зоне ЛПО, Па; E — толщина ЛПО, м; $\xi = \sqrt{3}/2$ — коэффициент защемления на торцах ЛПО; h — максимальная высота заходки, задавалась 5 м с учетом небольшого запаса.

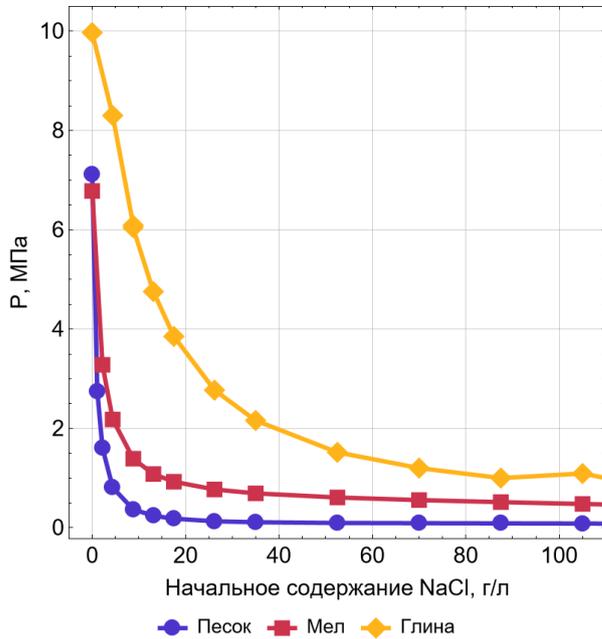


Рисунок 6 — Зависимость предельной несущей способности ЛПО от начального содержания NaCl в породах

На рисунке 6 представлена полученная зависимость предельной несущей способности ЛПО от начального содержания NaCl. Из данного рисунка видно, что с ростом содержания NaCl в поровой влаге предельная несущая способность ЛПО сильно снижается. Наиболее сильное снижение имеет место у песка, наименьшее — у глины. У мела степень снижения близка к песку.

Несмотря на то, что у всех пород наблюдается немонотонная зависимость толщины ЛПО от начального содержания NaCl, предельная несущая способность снижается монотонно. Это связано с тем, что при увеличении содержания NaCl толщина ЛПО меняется гораздо слабее по сравнению с содержанием незамороженной воды в зоне промерзания. Следовательно, при увеличении засоленности породы содержание незамороженной воды оказывает большее влияние на предельную несущую способность ЛПО. Поскольку длительная прочность пород монотонно убывает с увеличением содержания незамороженной воды, то по этой причине монотонно убывает и предельная несущая способность ЛПО. Этот вывод указывает на то, что при проектировании замораживания пород влияние растворенной соли должно учитываться не только в выражении для температуры замерзания воды, используемой при определении границ ЛПО, но и при проведении геомеханических оценок несущей способности ЛПО.

III научное положение

Методика расчета искусственного замораживания влажных засоленных пород, основанная на полученных зависимостях основных параметров ледопородного ограждения от содержания соли в породах различного типа, позволяет повысить безопасность проходки стволов в сложных гидрохимических и гидрогеологических условиях.

Для эффективного и безопасного строительства подземных сооружений способом искусственного замораживания, на этапе проектирования проводится расчет параметров

искусственного замораживания с учетом особенностей замораживаемых пород. В случае замораживания пород, содержащих пресную поровую воду, сначала решается статическая (геомеханическая) задача — определяется требуемая толщина ЛПО по критериям предельного напряженного и предельного деформированного состояния при заданной фиксированной температуре. Затем выполняется теплотехнический расчет: моделируется температурное поле и устанавливается момент времени, когда ЛПО достигает требуемой толщины. При этом важным условием является поддержание средней температуры ЛПО не выше фиксированной величины, при которой выполнялся геомеханический расчет.

При замораживании пород, насыщенных минерализованной водой, ситуация усложняется по ряду причин. В первую очередь при минерализации поровой воды ее температура замерзания понижается. При этом в процессе замораживания породы соль выпирается в незамороженную область породы, что приводит к повышению концентрации соли на фронте фазового перехода и еще большему понижению температуры замерзания воды. Кроме того, кривая содержания незамороженной воды в засоленных породах не только смещается в область более низких температур, но и становится более пологой. Это означает, что при одной и той же отрицательной температуре доля незамороженной воды в засоленных породах выше, чем в незасоленных.

Ввиду указанных выше причин расчет искусственного замораживания пород, насыщенных минерализованной водой, должен начинаться с теплотехнического расчета. Обоснованность данного утверждения заключается в том, что данный расчет позволяет определить максимальные концентрации соли, достигаемые на осевой плоскости ЛПО в процессе концентрирования соли вблизи границы фазового перехода, а также оценить содержание незамороженной воды, сохраняющейся на данной плоскости. Указанный параметр критически важен, поскольку, как показали исследования в рамках данной работы, прочность пород напрямую зависит от содержания незамороженной воды. Кроме того, в случае сильно проницаемых пород (пески, супеси, трещиноватые породы и т.п.) определение содержания незамороженной воды наиболее значимо, поскольку для таких пород гидроизоляционные условия для ЛПО могут приводить к более жестким ограничениям, чем при расчете требуемой несущей способности ЛПО исходя из предельных напряженного и деформированного состояний.

В ходе теплотехнического расчета определяется средняя температура ЛПО, необходимая для достижения требуемой степени льдонасыщенности и гарантии водонепроницаемости ЛПО. Исходя из этих критериев были сформулированы два критерия, которым должна удовлетворять средняя температура ЛПО.

В первую очередь средняя температура ЛПО должна удовлетворять критерию по гидроизоляционному условию ЛПО. Данное условие заключается в том, что при заданной средней температуре ЛПО гидравлическая проницаемость пород должна быть ниже некоторого предела. В качестве предела можно задаться величиной 0,00005 м/сут, которая согласно классификации Н.Н. Маслова соответствует практически

водонепроницаемым породам. Математически данное условие можно сформулировать следующим образом:

$$k = k_u \sqrt{\gamma(T_a, s_0)} \left[1 - \left(1 - \gamma(T_a, s_0)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \leq 0,00005 \text{ м/сут}, \quad (14)$$

где k , k_u — гидравлическая проницаемость мерзлой породы и незамороженной породы, соответственно, м/сут; T_a — средняя температура ЛПО, °С; s_0 — начальное содержание соли в породе, г/л.

Второй критерий, которому должна удовлетворять средняя температура ЛПО, определяется таким образом, чтобы при данной температуре основная часть фазового перехода завершилась и дальнейший отвод тепла в большей степени расходовался на понижение температуры породы. При выполнении данного критерия будет достигнут наибольший прирост прочности породы, т.е. дальнейшее понижение температуры приведет лишь к линейному повышению прочности. Анализ кривых удельной энтальпии различных пород позволил вывести математическую формулировку данного критерия:

$$T_l(s_0) - T_a \leq \frac{\rho_i L n \gamma(T_a, s_0)}{\rho c(T_a, s_0)}. \quad (15)$$

Таким образом, расчет средней температуры ЛПО следует проводить исходя из соблюдения одновременно критериев (15) и (16). Следует отметить, что такой расчет является некоторым начальным приближением, которое в дальнейшем может быть скорректировано, если следующая из него толщина ЛПО будет недостижима или будет обеспечиваться в течение слишком длительного временного отрезка.

После определения требуемой средней температуры ЛПО должен проводиться расчет параметров холодильной установки, при которых будет обеспечена средняя температура ЛПО не выше требуемой к моменту начала проходки ствола. Такой расчет должен проводиться с помощью математической модели, учитывающей: конвективный и диффузионный перенос теплоты; выпирание соли из замороженной зоны в незамороженную; морозное пучение.

Перед проведением теплотехнического расчета для засоленных пород в первую очередь необходимо определить фактическую минерализацию поровой влаги (массовая доля солей, входящих в поровую влагу, например NaCl, KCl, MgCl₂ и др.). Для инженерных расчетов рекомендуется использовать массовую долю NaCl-эквивалента, которая характеризует общее понижение температуры замерзания. Далее по известной минерализации необходимо определить температуру замерзания воды в порах. Из проведенных экспериментальных исследований установлено, что для NaCl температуру замерзания воды можно определить по следующей приближенной формуле:

$$T_l = T_0 - 0,065s, \quad (16)$$

где T_l — температура замерзания воды, °С; T_0 — температура замерзания пресной воды в породе, °С; s — содержание NaCl, г/л. Следует отметить, что параметр T_0 определяется из экспериментальных исследований.

Далее необходимо определить зависимость содержания незамороженной воды от температуры и содержания соли. Для расчета данной зависимости предлагается использовать модель ван Генухтена-Муалема (1). Материальные константы модели ω , m зависят от содержания соли в поровой влаге и должны определяться из экспериментальных исследований. В рамках данной работы зависимости ω , m от содержания NaCl были получены для песка, мела и глины (см. таблицу 1).

Таблица 1 — Параметры модели ван Генухтена-Муалема для различных пород (s дано в г/л)

Порода	Параметр	Значение
Песок	m	$0,36 - 0,0012s$
	ω	$0,0876 + 0,0096s$
Мел	m	$0,37 - 0,001s$
	ω	$0,148 + 0,011s$
Глина	m	$0,358 - 0,001s$
	ω	$1,012 + 0,0056s$

После параметризации кривой содержания незамороженной воды проводится расчет требуемой средней температуры ЛПО по ранее описанным критериям. Кроме того, определяются кривые теплопроводности и удельной теплоемкости пород по формулам (2) и (3). В итоге параметризованные теплофизические параметры по результатам экспериментальных исследований заносятся в модель искусственного замораживания пород для дальнейшего численного моделирования и определения требуемой температуры хладоносителя в замораживающих колонках.

Таблица 2 — Границы применимости методов расчета фильтрации влаги под действием градиента напора

	Коэффициентный метод	Метод функций тока	Численный расчет
$Pe \leq 5$	+	+	+
$5 < Pe \leq 15$	–	+	+
$Pe > 15$	–	–	+

Следует отметить, что при наличии выраженного фильтрационного течения (вызванного наличием градиента напора) расчет переноса влаги, как было отмечено ранее, может быть осуществлен как с помощью аналитических методов, так и численного решения. На основе проведенных исследований разработан критерий, позволяющий определить границы применимости каждого из методов. Критерий основан на расчете безразмерного числа Пекле Pe , записанного относительно расстояния между двумя соседними колонками. В таблице 2 представлены границы применимости методов расчета фильтрации поровой влаги в зависимости от Pe . Символом «+» в

таблице отмечена пригодность метода к расчету фильтрации поровой влаги, символом «←» — непригодность.

После окончания теплотехнического расчета проводится статический расчет ЛПО по двум группам критериев — прочностному (ограничение напряжений по сравнению с прочностью замороженной породы) и деформационному (ограничение относительных деформаций и смещений внутренней стенки ЛПО). Данные расчеты должны базироваться на определенных из лабораторных испытаний зависимостей прочностных свойств пород от содержания незамороженной воды при фактическом содержании соли в породе и различных температурах. При этом, для получения общих представлений о зависимости прочностных свойств пород от содержания незамороженной воды достаточно провести испытания при средней температуре ЛПО и при более низкой температуре (например, ниже на 10 °С). Важность таких исследований доказывается тем, что, как было показано ранее, длительная прочность пород нелинейно (см. формулу (4)) зависит от содержания незамороженной воды. При этом с повышением засоленности пород стремительно снижается несущая способность ЛПО (см. рисунок (10)) вследствие большего количества незамороженной воды.

Важно отметить, что на стадии пассивного замораживания принято снижать мощность холодильной установки. Однако при замораживании засоленных пород будет повышаться содержание соли в объеме ЛПО, которое может быть значительно выше начального значения. Ввиду этого, при повышении температуры на замораживающих колонках, может произойти резкое повышение содержания незамороженной воды вблизи колонок, что приведет к значительному снижению прочности пород в объеме ЛПО. Кроме того, в случае высокопроницаемых пород также велик риск нарушения гидроизоляционной функции ЛПО. Таким образом, решение о снижении мощности холодильной установки должно основываться на недопущении нарушения критерия (15) и определении степени снижения прочностных свойств пород при повышенной средней температуре ЛПО. При отсутствии возможности проведения такого анализа не рекомендуется снижать холодильную мощность на период поддержания толщины ЛПО, проходки и крепления ствола.

Рассмотренная выше методика была применена для расчета параметров искусственного замораживания горнодобывающего предприятия ООО «Еврохим-Саратовкалий». В ходе гидрогеологических исследований было установлено, что водоносные горизонты выше 250 м содержат соленые воды с минерализацией от 3,3 г/л до 5,7 г/л. Ниже 370 м водоносные горизонты содержат рассолы с минерализацией от 49 г/л до 185 г/л. Сама соль является многокомпонентной и в основе содержит хлориды, натрий, калий, сульфаты и магний. Для применения методики был выбран известняк, залегающий на глубине 384 м.

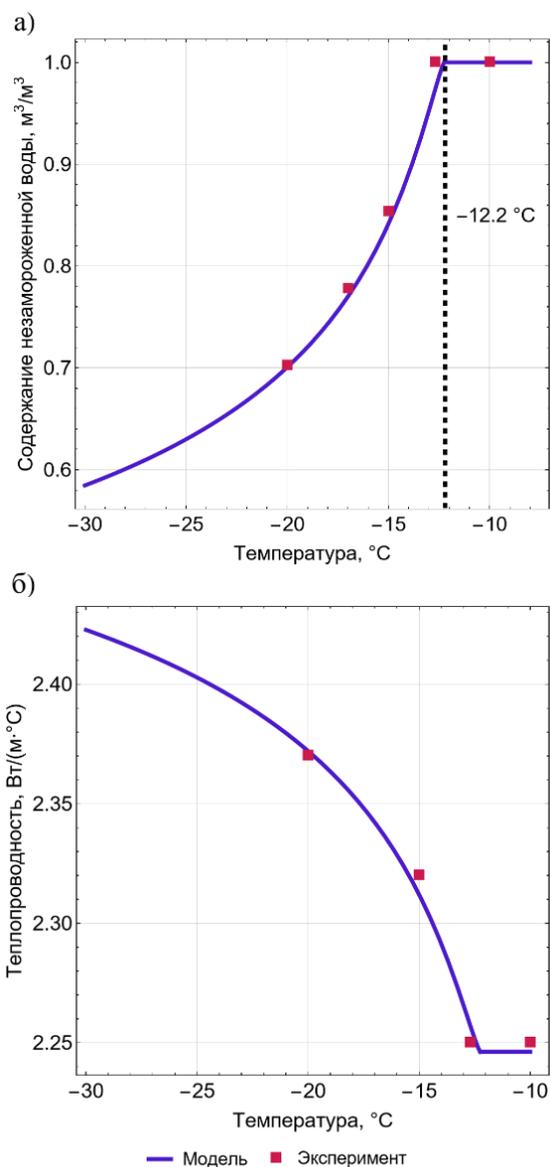


Рисунок 7 — Содержание незамороженной воды (а), теплопроводность (б) для слоя известняка (точки — экспериментальные данные, линии — аппроксимация)

Далее было проведено математическое моделирование искусственного замораживания известняка с целью определения необходимой температуры хладоносителя и режима работы холодильной установки для достижения средней температуры ЛПО. Принималось, что средняя температура ЛПО должна быть достигнута за 4 месяца после начала замораживания. Данный временной интервал является стандартным при разработке проектов по замораживанию.

Замораживание осуществлялось с помощью 50 замораживающих скважин диаметром 0,146 м. Радиус контура замораживания составлял 10 м. При моделировании было учтено влияние соли в поровой влаге и морозное пучение.

В ходе проведения теплотехнического расчета были интерпретированы экспериментальные данные по содержанию незамороженной воды и теплопроводности с помощью формул (1) и (2). При этом стоит отметить, что параметры модели ван Генухтена-Муалема были взяты аналогично мелу из таблицы (2). На рисунке 7 представлены полученные кривые и их сравнение с экспериментальными данными по содержанию незамороженной воды и теплопроводности. Из полученных результатов можно заключить, что предложенные модели с достаточной для практики точностью аппроксимируют экспериментальные данные. Важно также отметить, что параметры содержания незамороженной воды для мела, установленные в данном исследовании, оказались пригодны для моделирования экспериментальных данных другой породы.

После параметризации теплофизических свойств известняка была рассчитана средняя температура ЛПО из условия соблюдения критериев (15) и (16). В итоге средняя температура ЛПО составила $-22,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

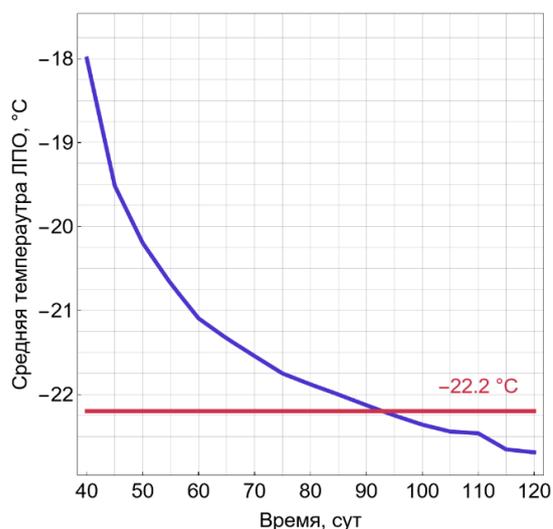


Рисунок 8 — Зависимость средней температуры ЛПО от времени в слое известняка

В ходе моделирования были рассмотрены различные сочетания температуры хладоносителя и режима работы замораживающей станции. В итоге было получено, что оптимальным сочетанием является понижение температуры хладоносителя со скоростью 1 °C/сут до достижения температуры -37 °C и дальнейшее ее поддержание. Для такого варианта на рисунке 8 представлен график изменения средней температуры ЛПО со временем. Из данного графика установлено, что средняя температура ЛПО будет достигнута за 94 дня.

Таблица 3 — Средняя температура ЛПО и температура хладоносителя на различных горных предприятиях к моменту начала проходки ствола

Средняя температура ЛПО			Температура хладоносителя
Проект	Расчет по критериям (15) и (16)	Моделирование	
ООО «Еврохим-Саратовкалий» (известняк, влажность 0,044 кг/кг, минерализация 49 г/л)			
—	-22,2 °C	-22,7 °C	-37 °C
Талицкий ГОК (мергель, влажность 0,13 кг/кг, минерализация 15 г/л)			
-10,0 °C	-13,6 °C	-15,4 °C	-35 °C
Дарасинский рудник (глина, влажность 0,2 кг/кг, минерализация 1 г/л)			
-10,0 °C	-10,2 °C	-10,7 °C	-26 °C

В таблице 3 представлено сравнение средней температуры ЛПО и температуры хладоносителя для наиболее неблагоприятных слоев пород на различных горных предприятиях. Из данной таблицы можно видеть, что с повышением минерализации поровой влаги уменьшается средняя температура ЛПО и соответственно температура хладоносителя. При этом небольшая разница в температуре хладоносителя между «Еврохим-Саратовкалий» и Талицким ГОК объясняется меньшим количеством замораживающих колонок на Талицком ГОК (40 штук) и большей влажностью (0,13 кг/кг) породы. Это привело к менее интенсивному замораживанию поровой влаги на Талицком ГОК и необходимости достижения и поддержания температуры хладоносителя менее -30 °C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи по определению влияния засоленности поровой влаги на теплофизические и прочностные свойства пород в процессе их искусственного замораживания. В ходе выполнения работы получены следующие научные результаты:

1. Проведены лабораторные исследования влияния засоленности поровой влаги на теплофизические и прочностные свойства типовых пород в интервалах замораживания: глины, мела и песка. Построены эмпирические зависимости этих свойств от температуры и содержания соли. Также изучено влияние соли на интенсивность морозного пучения: с увеличением содержания соли пучение снижается, за исключением диапазона малых концентраций, где наблюдается рост относительной гидравлической проницаемости.
2. Предложена математическая модель тепло- и массопереноса в системе «замораживающие колонки – порода», учитывающая влияние засоленности поровой влаги на теплофизические свойства пород и перенос соли при замораживании пород, позволяющая описывать нестационарное изменение температурного поля, пространственную неоднородность распределения влажности и содержания соли при искусственном замораживании влажных засоленных пород.
3. Разработаны методы оперативного расчета фильтрации поровой влаги под действием градиента напора. Данные методы по сравнению с численными методами позволяют сократить вычислительные ресурсы при математическом моделировании искусственного замораживания пород. Анализ разработанных методов показал, что их применимость ограничивается числами Пекле в диапазоне от 0 до 15.
4. На основе моделирования построены зависимости толщины ледопородного ограждения от начального содержания соли в поровой влаге. Установлено, что повышение соли снижает толщину ограждения, кроме мела и песка, где в определённом диапазоне содержание соли почти не влияет на толщину. Для глины такого эффекта нет. Предельная несущая способность ограждения снижается при увеличении содержания соли, особенно при малых концентрациях.
5. Разработана методика расчета искусственного замораживания влажных засоленных пород на основе результатов проведенного многопараметрического численного моделирования, позволяющая повысить эффективность искусственного замораживания пород и безопасность проходки шахтных стволов в сложных гидрохимических и гидрогеологических условиях.

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

публикации в изданиях, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ

1. Семин М.А., Бровка Г.П., Пугин А.В., Бублик С.А., Желнин М.С. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №. 9. – С. 79–93.
2. Semin M., Levin L., Bublik S., Brovka G., Brovka A., Agutin K. Parameterization of the Model of Artificial Clay Freezing Considering the Effect of Pore Water Salinity // Fluids. – 2022. – Т. 7. – №. 6. – статья № 186.
3. Бублик С.А., Семин М.А. Анализ подходов к расчету фильтрационных течений подземных вод при моделировании формирования ледопородных ограждений // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 46–60.
4. Bublik S., Semin M., Levin L., Brovka A., Dedyulya I. Experimental and Theoretical Study of the Influence of Saline Soils on Frozen Wall Formation // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13 – №. 18. – статья № 26.
5. Semin M.A., Bublik S.A. Phase Transitions in Saline Pore Water in Artificial Ground Freezing // Journal of Mining Science. – 2023. – Т. 59. – №. 4. – С. 98–109.
6. Semin M., Levin L., Bublik S. Influence of soil salinity on the bearing capacity of the frozen wall // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2024. – Т. 18. – №. 69. – С. 106–114.
7. Пугин А.В., Агеева К.М., Бублик С.А. Исследование критериев надежности ледопородного ограждения при контроле и управлении искусственным замораживанием горных пород // Недропользование. – 2024. – Т. 24. – №. 4. – С. 247–259.
8. Семин М.А., Левин Л.Ю., Бублик С.А., Бровка Г.П. Влияние концентрации растворенной соли на миграцию влаги в искусственно замораживаемых грунтах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – №. 2. – С. 111–122.
9. Левин Л.Ю., Семин М.А., Вшивков А.Н., Пантелеев И.А., Бублик С.А., Угольников М.В., Ложкин Д.В., Плехов О.А. Экспериментальное исследование закономерностей тепломассопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании // Геосистемы переходных зон. – 2025. – Т. 9. – №. 4. – С. 439–451.

прочие публикации

1. Пугин А.В., Агеева К.М., Богомягков А.В., Залазаев О.Д., Бублик С.А. Подготовка замороженного породного массива к ликвидации замораживающих и контрольно-термических скважин // Горное эхо. – 2024. – №. 2. – С. 86–91.
2. Семин М.А., Бублик С.А. Сравнительный анализ двух моделей при описании температурной зависимости количества незамерзшей воды в грунтах // Горное эхо. – 2024. – №. 3 (96). – С. 74–79.

патенты

1. Семин М.А., Левин Л.Ю., Головатый И.И., Бублик С.А. Патент на изобретение. Способ определения и контроля несущей способности ледопородных ограждений строящихся стволов шахт для регулирования параметров работы замораживающих станций и система для осуществления способа. Патентообладатель: ПФИЦ УрО РАН – патент № RU 2809873 С1, опубликовано 19.12.2023. – 17 с.

Сдано в печать _____ 2026 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А