

На правах рукописи



**Паршаков Олег Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ**

Специальность 25.00.20

Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2020

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: **Вознесенский Александр Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры физических процессов горного  
производства и геоконтроля  
НИТУ «МИСиС» (г. Москва)

**Соловьев Дмитрий Егорович**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории  
горной теплофизики ФГБУН Федеральный  
исследовательский центр «Якутский  
научный центр Сибирского отделения  
Российской академии наук» (г. Якутск)

Ведущая организация: **Горный институт (ГоИ КНЦ РАН)** –  
обособленное подразделение ФГБУН  
Федеральный исследовательский центр  
«Кольский научный центр Российской  
академии наук» (г. Апатиты)

Защита диссертации состоится «...» ..... 2020 года в ...-... часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.02 при «ГИ УрО РАН» по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ГИ УрО РАН»: <http://www.mi-perm.ru>

Автореферат разослан «...» ..... 2020 года.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 15 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. Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02. Электронная почта: [bba@mi-perm.ru](mailto:bba@mi-perm.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета,  
канд. геол.-минерал. наук., доцент



Б.А. Бачурин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

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

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

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

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

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

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

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

### **Цель работы**

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

## **Основная идея работы**

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

## **Основные задачи работы:**

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

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

### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

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

### **Научная новизна:**

1. Произведен выбор параметров калибровки математической модели из множества теплофизических свойств горных пород, от которых зависит распределение температуры в породном массиве и концентрации объемной доли льда в порах.
2. Разработан способ контроля термодинамических процессов, происходящих в обводненном породном массиве в условиях его искусственного замораживания, основанный на решении обратной задачи Стефана для горизонтального слоя влагонасыщенных горных пород.
3. Исследовано влияние выхода из строя замораживающих колонок на распределение температуры в слое замораживаемой горной породы.
4. Выполнено обоснование технологических параметров способа термометрического контроля замораживаемого породного массива, влияющих на точность расчета его температурного поля и обеспечивающих получение достоверной информации о параметрах ледопородного ограждения строящегося шахтного ствола в сложных гидрогеологических условиях.

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

### **Практическое значение и реализация результатов работы**

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

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

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

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

## **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научных исследований «ГИ УрО РАН», проводившихся в период с 2018 г. по 2019 г. по теме «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими и аэрологическими процессами в рудничной атмосфере и массивах горных пород при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях», а также с тематикой хоздоговорных работ с предприятиями ОАО «Беларуськалий», ЗАО «ВКК» и ИООО «Славкалий».

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

## **Апробация работы**

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

## **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора проведены: постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования процессов формирования и состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и численных экспериментов, разработка научных решений и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

## **Публикации**

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

## **Объем работы**

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

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **I научное положение**

*Алгоритм калибровки теплофизических свойств обводненных горных пород, основанный на численном решении обратной задачи Стефана с выделенным комплексом независимых параметров задачи, позволяющий разрабатывать адекватные математические модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве.*

Перед началом строительства шахтных стволов с целью получения комплексной информации о геологических и гидрогеологических условиях замораживаемого породного массива на промышленной площадке проводятся инженерно-геологические изыскания, включающие в себя исследования физико-механических и теплофизических свойств образцов горных пород, отобранных из контрольно-стволовых скважин. Однако теплофизические расчеты, использующие в качестве исходных данных полученные параметры горных пород, оказываются неэффективными при решении практических задач. Несоответствие теоретических и экспериментальных данных объясняется:

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

Дополнительно погрешность результатов математического моделирования обусловлена влиянием на процесс искусственного замораживания таких факторов, как

наличие пустот в затрубном пространстве замораживающих скважин и отклонения осей скважин от проектного направления (идеально вертикального).

Указанные факты свидетельствуют о необходимости проведения калибровки начальных теплофизических свойств обводненных горных пород, что привело к постановке коэффициентной обратной задачи Стефана и разработке метода ее решения.

На первом этапе исследования для определения приближенного распределения температуры в горизонтальном разрезе слоя замораживаемой горной породы решалась прямая задача Стефана.

Математическая постановка прямой двумерной двухфазной задачи Стефана в декартовых координатах задается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right], \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_{lq}(1 - \phi_{ice}) + \lambda_{sd}\phi_{ice}, \quad (2)$$

$$H(T) = \begin{cases} \rho_{lq}c_{lq}(T - T_{p1}) + \rho_{lq}wL, & T_{p1} < T \\ \rho_{lq}wL \cdot (1 - \phi_{ice}), & T_{p2} < T < T_{p1}, \\ \rho_{sd}c_{sd}(T - T_{p2}), & T < T_{p2} \end{cases} \quad (3)$$

$$[\lambda \mathbf{n} \cdot \nabla T - \alpha(T_{fb} - T)]|_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (4)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0(h), \quad (5)$$

$$T|_{t=0} = T_0(h), \quad (6)$$

где  $H$  — удельная энтальпия, Дж/м<sup>3</sup>;  $x, y$  — физические координаты, м;  $T$  — физическая температура, °С;  $t$  — физическое время, сек;  $\lambda_{lq}, \lambda_{sd}$  — теплопроводности среды в зонах охлаждения и льда соответственно, Вт/(м·°С);  $c_{lq}, c_{sd}$  — удельные теплоемкости среды в зонах охлаждения и льда соответственно, Дж/(кг·°С);  $\rho_{lq}, \rho_{sd}$  — плотности среды в зонах охлаждения и льда соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{p1}, T_{p2}$  — температуры начала и конца фазового перехода (полной кристаллизации) соответственно, °С;  $\phi_{ice}$  — объемная доля льда в порах, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $L$  — удельная теплота плавления льда, Дж/кг;  $w$  — начальное влагосодержание массива, кг/кг;  $T_{fb}$  — температура стенок замораживающей скважины, °С;  $T_0$  — температура непо потревоженного породного массива на удалении, °С;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена на границе с замораживающими скважинами, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $h$  — средняя глубина слоя горной породы, м;  $\Omega_{fb} = \cup \Omega_{fbi}$  — границы со всеми замораживающими скважинами  $i = 1, \dots, N$ ;  $\Omega_{out}$  — внешняя граница области моделирования,  $\mathbf{n}$  — координата вдоль нормали к границе  $\Omega_{fb}$ , м.

Для численного расчета теплораспределения применяется метод конечных разностей.

На рисунке 1 приведена используемая для расчетов декартовая конечно-разностная сетка и эффективная площадь теплообмена.

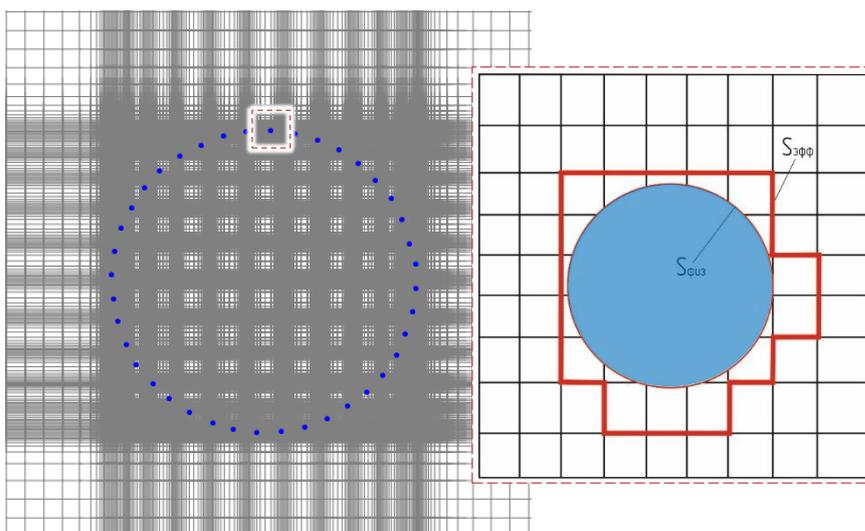


Рисунок 1 — Конечно-разностная сетка и эффективная площадь теплообмена

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

На втором этапе исследования в целях калибровки начальных параметров математической модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве, на основе экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах разработан метод решения обратной задачи Стефана.

Первоначально в работе произведен выбор независимых параметров калибровки математической модели из множества теплофизических свойств горных пород, от которых в наибольшей степени зависит получаемое решение — распределение температур в массиве и объемной доли льда в порах. Анализ прямой задачи Стефана в безразмерных величинах позволил выделить 5 безразмерных комплексов, в которых содержится информация о теплофизических свойствах рассматриваемой среды:  $Fo_{sd}, Fo_{lq}, Ste_{sd}, Ste_{lq}, Bi$ .

Безразмерные теплофизические комплексы — чисел Фурье  $Fo$ , Стефана  $Ste$  и Био  $Bi$  определяются следующим образом:

$$Fo_i = \frac{\lambda_i \Delta t}{\rho_i c_i L^2}, \quad Ste_i = \frac{c_i (T_0 - T_{fb})}{wL}, \quad Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_{lq}}. \quad (7)$$

В результате калибровка теплофизических параметров задачи (1) — (6) представляет собой решение коэффициентной обратной задачи Стефана. Обратная задача переопределяет прямую задачу (1) — (6) посредством введения заданных измеренных температур  $T_i^{(c)}(t)$  в месте расположения  $(x_i, y_i)$  каждой контрольно-термической скважины №  $i$ .

$$T(t, x, y) = T_i^{(c)}(t), i = 1, \dots, N_c, \quad (8)$$

где  $N_c$  — количество контрольно-термических скважин.

В данной работе вместо жесткого условия (8) рассматривался функционал рассогласований теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных температур в контрольных скважинах.

$$I = \sum_{i=1}^{N_c} \int_0^{t_\Sigma} (T_i^{(c)} - T_i^{(m)}) dt. \quad (9)$$

Здесь  $T_i^{(c)}$  — экспериментальная температура в  $i$ -й скважине, °С;  $T_i^{(m)}$  — модельная температура в  $i$ -й скважине, °С;  $t_\Sigma$  — время замораживания, сут.

Таким образом, решение обратной задачи Стефана сводится к минимизации функционала (9) с условиями (1) — (6) и состоит в определении поля температур  $T(t, x, y)$ , а также значений теплофизических параметров горных пород.

Исследование функционала рассогласований температур позволило определить зависимость влияния калибруемых параметров на решение обратной задачи Стефана. Функционалы рассогласования температуры в контрольно-термических скважинах в зависимости от теплофизических свойств породы представлены на рисунке 2.

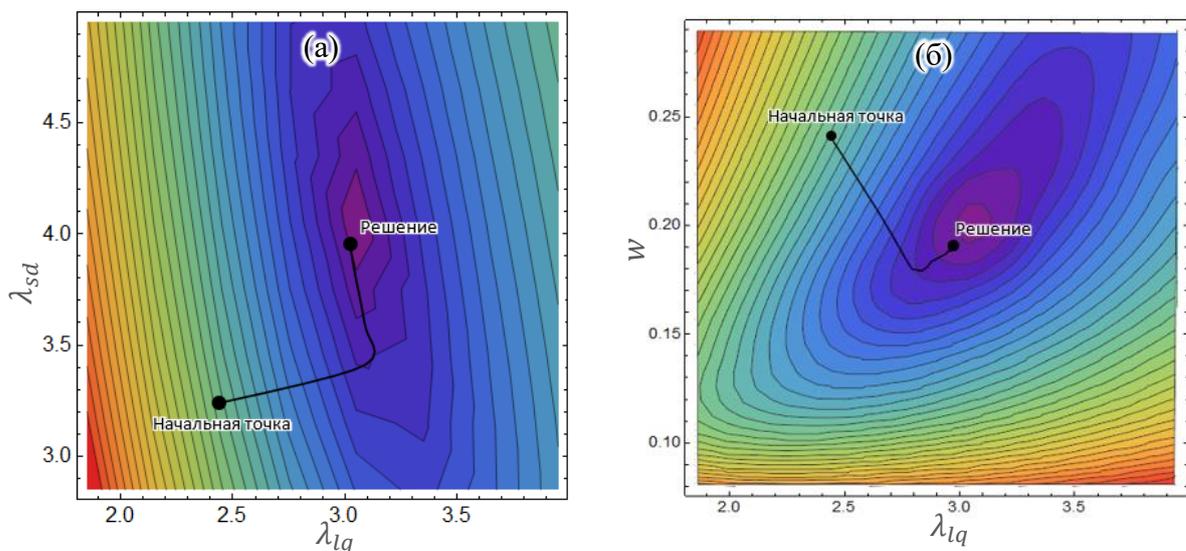


Рисунок 2 — Функционал рассогласований температуры пород в скважинах: а) — как функция теплопроводностей охлажденной и мерзлой породы, б) — как функция теплопроводности охлажденной породы и влагосодержания

На основании выполненных исследований разработан алгоритм калибровки теплофизических свойств обводненных горных пород, заключающийся в минимизации функционала рассогласований (9) между модельными и измеренными температурами в местах расположения контрольно-термических скважин.

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

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

1. Определение начальных приближений  $\mathbf{p}^{(0)}$ .
2. Расчет прямой задачи Стефана, определение текущей ошибки  $I$  по формуле (9), сравнение с максимально допустимой ошибкой  $\varepsilon_{max}$ . Если  $I < \varepsilon_{max}$ , то требуемая точность достигнута и следует завершить расчет, иначе — переход к шагу 3.
3. Выбор малых отклонений калибруемых параметров  $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$  на  $k$ -й итерации алгоритма. Расчет прямой задачи Стефана для каждой компоненты вектора  $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$ .

Вычисление частных производных функционала  $I$ :

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

$$\nabla I^k = \left( \frac{\Delta I^k}{\Delta p_1}, \dots, \frac{\Delta I^k}{\Delta p_n} \right).$$
(10)

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

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

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \sigma \Delta \mathbf{p}^k,$$
(11)

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

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

$$p_i^k \in [p_{i \min}, p_{i \max}]. \quad (12)$$

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

Проведенные исследования, направленные на разработку метода решения обратной задачи Стефана, позволяют обеспечить максимальное соответствие модельных и фактических значений температуры горных пород в местах расположения контрольно-термических скважин за счет калибровки теплофизических параметров термодинамической модели замораживаемого породного массива.

## **II научное положение**

*Система контроля формирования и состояния ледопородных ограждений, основанная на интеграции математической модели термодинамических процессов, происходящих в породном массиве с учетом влияния технологических факторов, и экспериментальных измерений полей температуры горных пород и параметров заморозки, позволяющая определять состояние ледопородного ограждения на всех этапах строительства шахтных стволов.*

На основе интеграции метода решения обратной задачи Стефана и данных технологии оптоволоконной термометрии, которая позволяет определять временную и пространственную динамику изменения температуры горных пород по всей глубине контрольно-термических скважин, разработана автоматизированная система термометрического контроля формирования и состояния ледопородных ограждений шахтных стволов.

Система контроля состоит из следующих структурных элементов:

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

Схема взаимодействия всех структурных элементов автоматизированной системы контроля ледопородных ограждений представлена на рисунке 3.

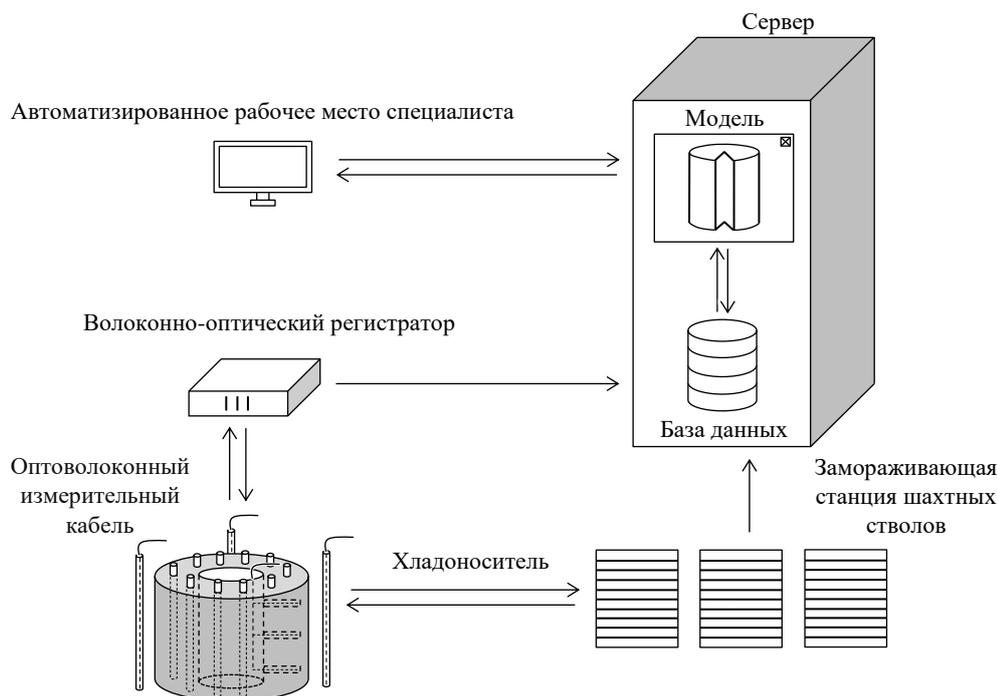


Рисунок 3 — Схема взаимодействия структурных элементов системы контроля ледопородных ограждений

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

- хранить все данные геологических и теплофизических свойств горных пород, полученных в результате проведения инженерно-геологических изысканий на участке строительства шахтных стволов;
- осуществлять сбор и хранение параметров работы замораживающей станции шахтных стволов;
- интерпретировать результаты термометрии контрольных скважин в процессе активного периода замораживания горных пород, а также результаты термометрии шпуров в процессе их оттаивания;
- прогнозировать температурное поле во всем замораживаемом объеме участка породного массива в различные моменты времени с учетом уточненных расчетных параметров математической модели и влияния различных технологических факторов на состояние ледопородного ограждения.

Алгоритм работы автоматизированной системы термометрического контроля состояния ледопородных ограждений представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 — Алгоритм работы автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений

Алгоритм работы системы контроля позволяет определять невязку модельных и фактических значений температуры замораживаемых горных пород в целях последующей ее минимизации посредством метода решения обратной задачи Стефана.

Для выполнения непрерывного и оперативного контроля ледопородных ограждений в рамках работы разработано информационно-аналитическое программное обеспечение «FrozenWall».

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

Динамика температуры в контрольно-термической скважине и визуализация распределения температуры в замораживаемом породном массиве, полученные при помощи программы, представлены на рисунке 5.

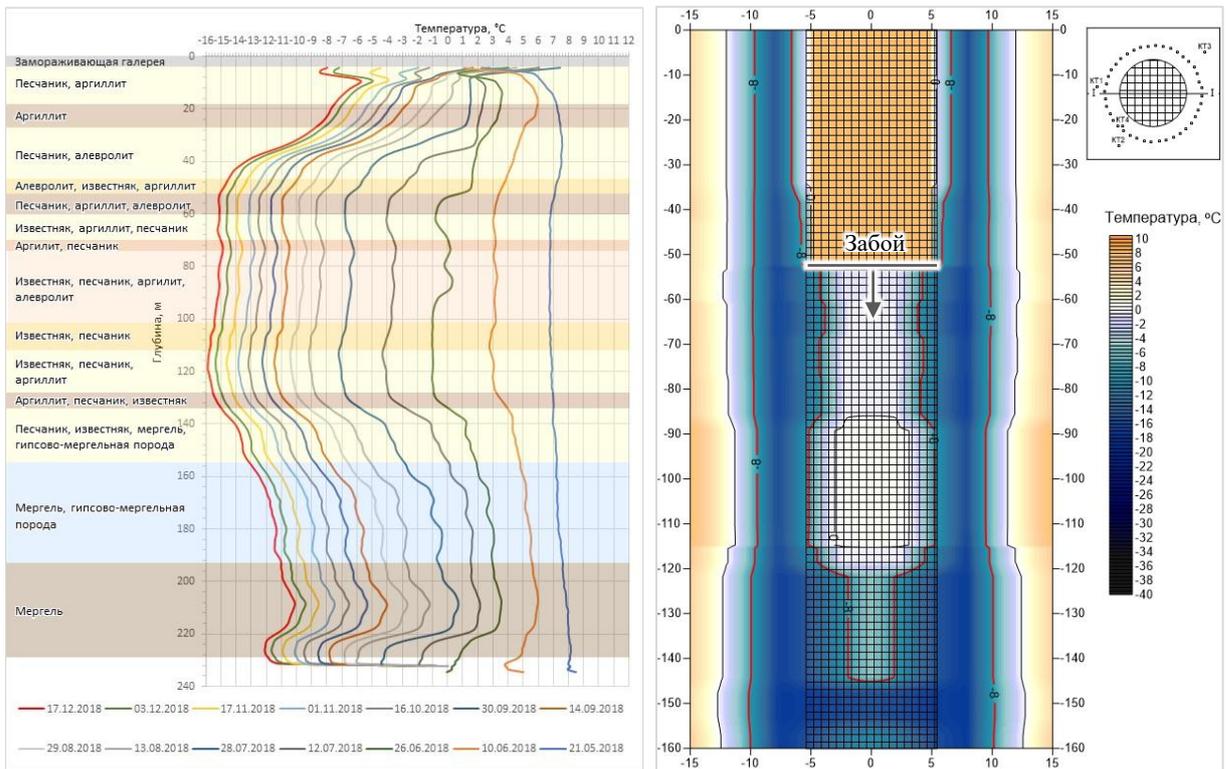


Рисунок 5 — Динамика температуры горных пород в контрольно-термической скважине и распределение температуры по глубине замораживания

Данные о фактической температуре горных пород в контрольно-термических скважинах, на основании которых производится калибровка расчетных теплофизических параметров математической модели, в период активного замораживания участка породного массива верифицируются при помощи высокоточного локального термодатчика. В пассивный период заморозки при проходке шахтных стволов верификация результатов математического моделирования, полученных при помощи термодинамической модели, выполняется посредством натуральных замеров в шахтных условиях (рисунок 6).

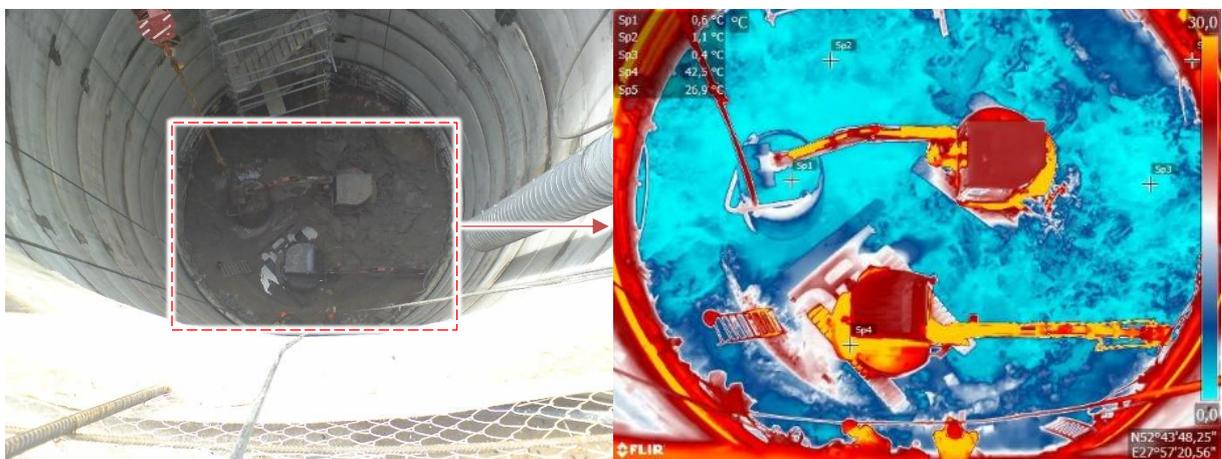


Рисунок 6 — Фото- и тепловизионный снимки забоя строящегося Скипового ствола № 1 Нежинского ГОК

Результаты прогнозирования теплораспределения с учетом калибровки в процессе замораживания породного массива теплофизических параметров модели, учитывающей влияние технологических факторов, позволяют определять параметры ледопородного ограждения в периоды его формирования, поддержания и оттаивания.

Таким образом, в ходе осуществления термометрического контроля при помощи разработанной системы ежедневно формируются отчеты о состоянии ледопородного ограждения, которые направляются специалистам строящихся горных предприятий для принятия целесообразных технических решений, обеспечивающих безопасность ведения горных работ, а также эффективность строительства шахтных стволов в целом.

Автоматизированная система термометрического контроля ледопородных ограждений внедрена и адаптирована на рудниках Петриковского ГОК, Талицкого ГОК и Нежинского ГОК.

### **III научное положение**

*Определение технологических параметров способа термометрического контроля на основе экспериментальных исследований и решения задачи оптимизации размещения контрольно-термических скважин с учетом обоснованного пространственного разрешения измерений температуры горных пород позволяет обеспечить точность прогнозирования теплораспределения в условиях искусственного замораживания породного массива.*

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

На основании статистической обработки экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах строящихся шахтных стволов установлены закономерности влияния процесса искусственного замораживания на локальные участки породного массива.

Динамика экспериментальных измерений температуры глины в контрольно-термических скважинах (КТ1, КТ2, КТ3, КТ4), пробуренных на замораживаемом участке породного массива шахтного ствола № 1 рудника Нежинского ГОК, а также фактическое положение границ ледопородного ограждения относительно расположения

термометрических и замораживающих скважин на момент (90 суток после начала замораживания) достижения им проектных параметров представлены на рисунке 7.

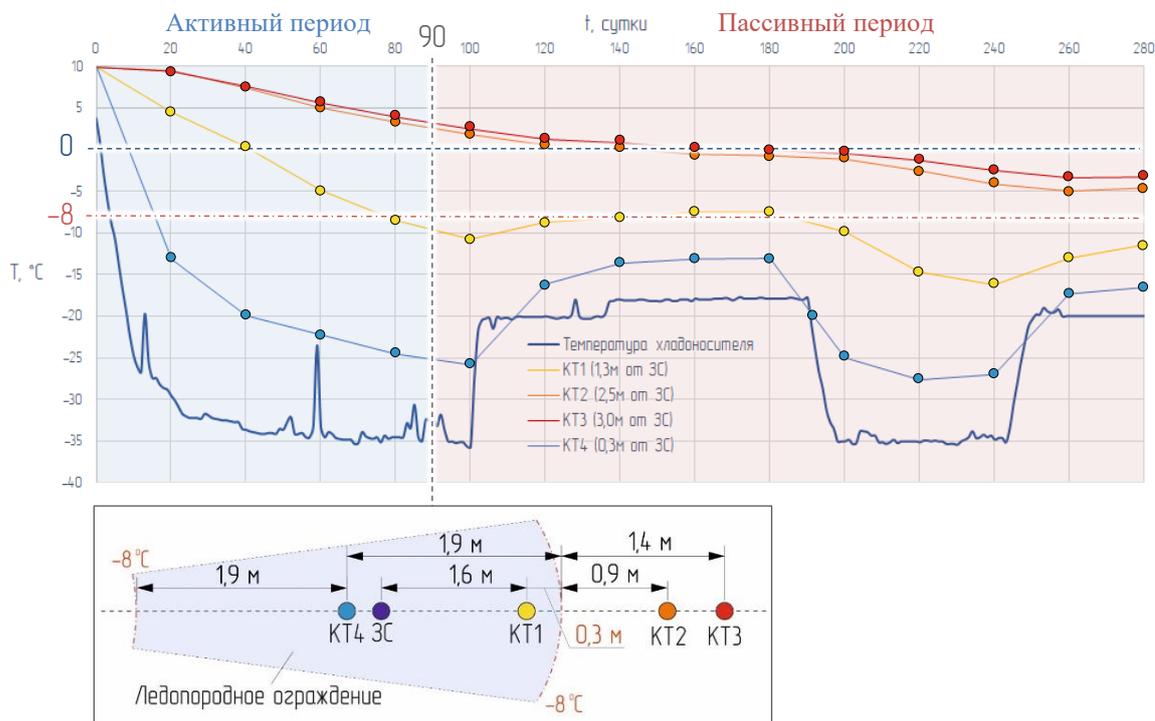


Рисунок 7 — Динамика температуры слоя глины в контрольно-термических скважинах и фактическое положение границ ледопородного ограждения на момент достижения им проектных параметров

В работе в целях повышения точности решения обратной задачи Стефана решена задача определения оптимального положения контрольно-термической скважины по критерию чувствительности температуры к входным параметрам задачи. Идея исследования заключалась в определении средней вариации температуры относительно управляемого параметра и поиска в расчетной области наибольшего отклонения температуры от его среднего значения. Максимальное отклонение температуры в определенной точке является потенциальным местом заложения скважины.

Поиск оптимального положения термометрической скважины осуществлялся при помощи информационной матрицы Фишера:

$$\mathbf{F}(\xi, t_k) = \frac{1}{N(t_k - t_0)} \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{S}(\theta, \xi)^T \mathbf{S}(\theta, \xi) dt. \quad (13)$$

Здесь  $\xi$  — множество точек, в которых расположены скважины:

$$\xi = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}, \quad (14)$$

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

$$\mathbf{S}(\theta) = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_1} \right|_{(x_1, y_1)} & \dots & \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_m} \right|_{(x_1, y_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_1} \right|_{(x_N, y_N)} & \dots & \left. \frac{\partial T}{\partial \theta_m} \right|_{(x_N, y_N)} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

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

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

$$\Phi(\xi, t_k) = -\ln \det \mathbf{F}(\xi, t_k). \quad (16)$$

Оптимальный план  $\xi^*$  эксперимента находится из решения задачи минимизации функции  $\Phi$ :

$$\xi^* = \operatorname{arginf} \Phi(\xi, t_k). \quad (17)$$

Для поиска минимума функции  $\Phi$  использовался метод сопряженных градиентов. Вариация температуры  $T$  определялась относительно одного коэффициента теплопроводности в зоне льда  $\lambda_{sd}$ , поэтому информационная матрица Фишера сведена к скалярной величине.

На рисунке 8 представлены распределения функции  $\Phi$  в расчетной области  $\Omega_0$  для исследуемого слоя мела при различных временах  $t_k$  окончания измерений температуры в контрольно-термической скважине с момента замораживания  $t_0 = 72$  ч.

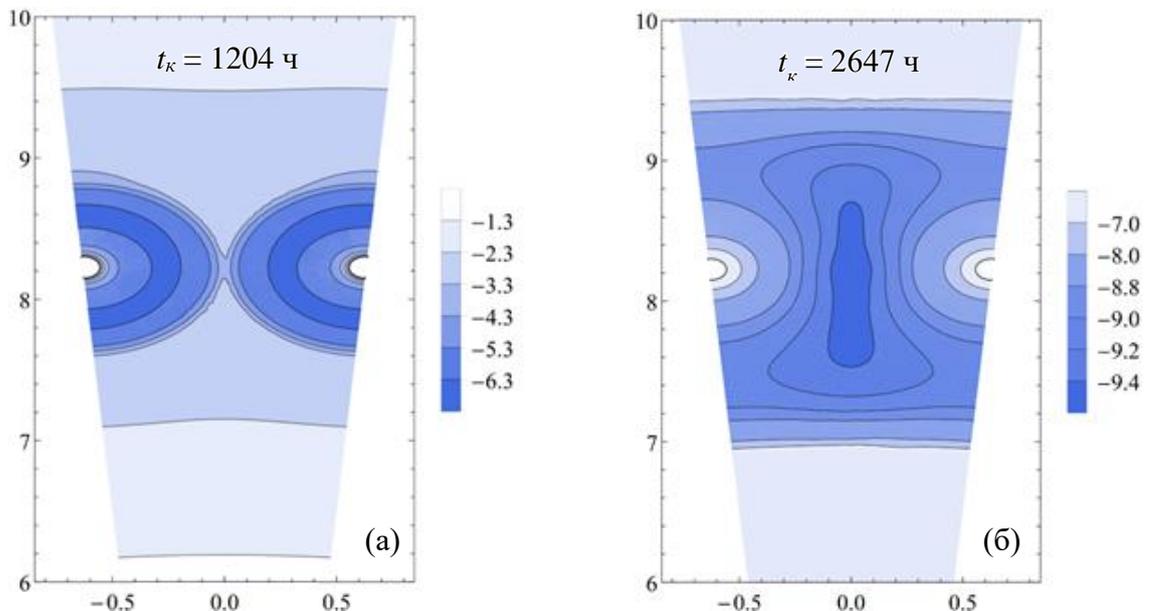


Рисунок 8 — Распределение D – критерия  $\Phi$  при различных  $t_k$  для слоя мела

На рисунке 8а представлено распределение функции  $\Phi$  для момента времени  $t_k = t_{min,ph} = 1204$  ч, в который происходит смыкание границ фазового перехода. Для данного момента минимумы функции  $\Phi$  расположены на кривых, находящихся в двух

областях вблизи замораживающих скважин. На рисунке 8б распределение представлено для момента времени  $t_k = t_{min,pr} = 2647$  ч, где  $t_{min,pr}$  — время достижения ледопородным ограждением проектной толщины. На рисунке видно, что для этого времени минимум функции  $\Phi$  расположен в замковой плоскости на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами.

Для решения вопроса о требуемом количестве контрольно-термических скважин, которое позволит обеспечить получение информации о состоянии ледопородного ограждения в полном объеме (по всему замораживаемому контуру), в работе проведен анализ влияния выхода из строя замораживающих колонок на распределение температуры в замораживаемом слое горной породы.

Анализ влияния выхода из строя замораживающих колонок показал, что выявить аварийную ситуацию с учетом погрешности измерения температуры горных пород  $\pm 1,0$  °С возможно не ранее чем через 15 суток после поломки колонок, при этом количество контрольно-термических скважин должно быть не менее 30 % от общего количества замораживающих скважин.

Для определения необходимого пространственного разрешения измерения температуры по глубине контрольно-термической скважины разработан следующий алгоритм. Первоначально производится объединение горных пород, слагающих породный массив, в укрупненные литологические разности по их теплофизическим характеристикам ( $\lambda_{sd}, \lambda_{lq}, c_{sd}, c_{lq}, w$ ). Затем для получения детальной информации об изменении температуры по глубине каждой выделенной литологической разности предусматриваются минимум три точки замеров. Отмечено, что пространственное разрешение измерений распределенной температуры горных пород должно быть не более 1 метра.

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

Результаты исследований оптимальных технологических параметров включены в Инструкцию по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

1. Левин, Л.Ю. Контроль формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся стволов Петриковского ГОК на основе оптоволоконной термометрической технологии / Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, О.С. Паршаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. Т. 1. № 5-1. — С. 129 — 136.
2. Левин, Л.Ю. Математический метод прогнозирования толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков // ФТПРПИ. Новосибирск, 2017. — С. 154 — 161.
3. Левин, Л.Ю. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков, Е.В. Колесов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. — С. 255 — 267.
4. Левин, Л.Ю. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / Л.Ю. Левин, И.И. Головатый, Д.А. Диулин, О.С. Паршаков // Горный журнал. Издательство «Руда и металлы». 2018. № 8. — С. 48 — 53.
5. Левин, Л.Ю. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков // Записки Горного института. 2019. Т. 237. — С. 268 — 274.

**публикации в других изданиях**

6. Паршаков, О.С. Разработка способа контроля формирования и состояния ледопородного ограждения шахтных стволов / О.С. Паршаков // Стратегия и процессы освоения георесурсов. ГИ УрО РАН. Пермь. 2017. — С. 288 — 292.
7. Левин, Л.Ю. Экспериментальные измерения температуры породного массива с использованием оптоволоконной технологии для анализа формирования ледопородного ограждения шахтных стволов / Л.Ю. Левин, О.А. Плехов, И.А. Пантелеев, О.С. Паршаков // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. 2017. — С. 292 — 293.

8. Паршаков, О.С. Контроль и управление состоянием ледопородных ограждений при строительстве шахтных стволов / О.С. Паршаков // Стратегия и процессы освоения георесурсов. ГИ УрО РАН. Пермь. 2018. — С. 266 — 271.
9. Паршаков, О.С. Применение оптоволоконной термометрии в горном деле / О.С. Паршаков, Д.С. Кормщиков // Сборник тезисов II Всероссийской конференции. Пермь. 2018. — С. 33 — 35.
10. Паршаков, О.С. Обзор аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов специальным способом искусственного замораживания горных пород / О.С. Паршаков // Горное эхо. Горный институт УрО РАН. № 2 (75). 2019. — С. 89 — 91.

#### **патенты и свидетельства об официальной регистрации**

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2018666337. «FrozenWall». / Богомягков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А. // заявитель и правообладатель: ПФИЦ УрО РАН. — № 2018663501 заявл. 28.11.2018. опубл. 17.12.2018. Реестр программ для ЭВМ. — 1 с.

---

Сдано в печать «...» ..... 2020 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А