

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
(ФИЦ КНЦ РАН)

**ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГоИ КНЦ РАН)**

ул. Ферсмана, 24, Апатиты,  
Мурманская обл., Россия, 184209  
Факс: (815 55) 74625  
Тел.: (815 55) 74342, 79520  
E-mail: [goi@ksc.ru](mailto:goi@ksc.ru)

ОКПО 24903563. ОГРН 1025100508333  
ИНН/ КПП 5101100280/511845007

от 08.09 2020 г. № 186.04-01-23-214

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного совета  
Д 004.036.02 при ПФИЦ УрО РАН,  
чл.-корр. РАН  
Баряху А.А.

614007, г. Пермь,  
ул. Сибирская, 78-А

**Глубокоуважаемый Александр Абрамович!**

Направляем Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу Паршакова О.С. «Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений», представленную к защите в диссертационный совет Д 004.036.02 при ПФИЦ УрО РАН на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная азрогазодинамика и горная теплофизика».

Приложение.

Отзыв ведущей организации на 6 стр. в 2-х экз.

Директор института, д.т.н.



С.В. Лукичев

М.П.



Исп. Чуркин О.Е.  
(81555) 79-542

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
(ФИЦ КНЦ РАН)

**ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГоИ КНЦ РАН)**

ул. Ферсмана, 24, Апатиты,  
Мурманская обл., Россия, 184209

Факс: (815 55) 74625

Тел.: (815 55) 74342, 79520

E-mail: [root@goi.kolasc.net.ru](mailto:root@goi.kolasc.net.ru)

ОКПО 24903563, ОГРН 1025100508333

ИНН/ КПП 5101100280/511845007

от 08.09. 2020 г. № 186.04- 01-23-215

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ГоИ КНЦ РАН, д.т.н.

Лукичев С.В.

« 8 » сентября 2020 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН)

на диссертационную работу Паршакова Олега Сергеевича «Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертационная работа изложена на 140 страницах, содержит 6 таблиц и 43 рисунка. Список цитируемой литературы включает 180 источников, включая 72 зарубежных.

**Актуальность избранной темы.**

Одной из проблем промышленного освоения месторождений, которые залегают в сложных геологических и гидрогеологических условиях, является проблема создания вокруг проектного сечения ствола надежного защитного ограждения из мерзлой водонасыщенной породы. Именно под защитой созданного ледопородного ограждения ведутся горнопроходческие работы, что накладывает определенные требования на геометрические параметры и герметичность ограждения.

Точность расчетных значений геометрических параметров ледопородного ограждения зависит от используемых в вычислениях физических свойств горных пород. Практика свидетельствует, что теплофизические параметры слоев породного массива, получаемые в результате лабораторных исследований, зачастую имеют высокую погрешность, что приводит математические модели, описывающие тепло- и массообменные процессы, к недостаточной эффективности при решении практических задач на горнорудных предприятиях в сложных гидрогеологических условиях. Дополнительными причинами, которые увеличивают погрешность результатов расчета, являются неоднородность и анизотропность породного массива, недостаточность выборки образцов керна, а также технологические факторы (пустоты между породным массивом и стенками скважин, отклонение проектных положений оси скважин от вертикали), оказывающие влияние на процесс искусственного замораживания.

В соответствии с действующими правилами безопасности за состоянием замороженного массива предполагается организация систематического контроля. К сожалению, в силу несовершенства способов контроля целостности ледопородного ограждения, а также

недостаточной точности расчетов его параметров на ряде объектов горной промышленности (Россия, Туркмения) имели место аварийные ситуации. А это приводит к затоплению шахтных стволов, увеличению сроков строительства и финансовых затрат, а, главное, – снижает уровень безопасности ведения горных работ.

Поэтому разработка нового способа контроля ледопородных ограждений, который основан на использовании оптоволоконной технологии, а также математической интерпретации результатов термометрического контроля формирования и состояния ограждения, представляется важным и актуальным исследованием.

#### **Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства.**

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами научных исследований «ГИ УрО РАН», которые проводились 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». Кроме того, выполненные исследования хорошо соответствуют тематике хоздоговорных работ института с предприятиями ОАО «Беларуськалий», ЗАО «ВКК» и ИООО «Славкалий».

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

#### **Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

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

Полученные диссертантом в ходе выполнения исследований результаты обладают научной новизной и имеют важные практические преимущества перед результатами предшественников.

Диссертант выносит на защиту три научных положения непосредственно связанных с новыми научными результатами:

- 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 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.

Полученные в диссертационной работе практические 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.

Работа построена традиционно, изложена логично и по своему содержанию полностью отвечает научно-квалификационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук.

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, показана научная новизна и практическая значимость исследования. Диссертант аргументировано формулирует обязательные положения по актуальности, научной новизне и практической значимости работы, дает обоснование выбранного пути исследований.

**Первая глава** включает обзор аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов специальным способом искусственного замораживания горных пород, анализ существующих способов контроля формирования и состояния ледопородного ограждения, а также методов расчета параметров ледопородного ограждения в замораживаемом обводненном породном массиве. На основании выполненного анализа диссертант формулирует цель исследований и задачи, требующие своего решения.

**Вторая глава** посвящена разработке метода решения обратной задачи Стефана на основе применения экспериментальных измерений температуры горных пород. Достаточно подробно представлена математическая постановка прямой и обратной задач Стефана для горизонтального слоя обводненного породного массива с однородными и изотропными теплофизическими свойствами. Приведены аргументы в защиту принятых гипотез, касательно теплообмена в вертикальном направлении и выбора значений температур областей моделирования (породный массив, замораживающие скважины). Представлены результаты анализа системы уравнений двухфазной двумерной задачи Стефана в безразмерном виде, что позволило диссертанту определить количество независимых параметров калибровки предложенной модели. Описан численный метод решения обратной задачи Стефана, посредством которого выполняется минимизация функционала рассогласований между модельными и измеренными температурами в местах расположения контрольных скважин. На примере шахтных стволов рудника Талицкого ГОКа показано, что откалиброванные значения теплофизических свойств слоев горных пород существенно отличаются от начальных значений, полученных из инженерно-геологических изысканий. Кроме того, в главе приведены результаты исследования влияния технологических факторов (теплообмен горных пород с воздухом, выделение тепла гидратации цемента при твердении бетона во время возведения крепи ствола) на состояние ледопородного ограждения при проходке шахтного ствола.

**В третьей главе** представлены результаты выполненных исследований, которые направлены на разработку автоматизированной системы термометрического контроля состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов. Обсуждаются результаты верификации показаний оптоволоконной системы термометрического контроля, результаты математического моделирования термодинамических процессов, происходящих в условиях замораживаемого породного массива, на основании которых рассчитываются фактические параметры ледопородного ограждения. В результате интеграции экспериментальных измерений температуры в контрольно-термических скважинах и метода решения обратной задачи Стефана автор показывает, что разрабатываемая система позволяет выполнять прогноз теплового состояния породного массива, как на этапе замораживания, так и оттаивания.

**Четвертая глава** представляет результаты исследований по обоснованию технологических параметров способа термометрического контроля ледопородного ограждения. Приведены результаты статистической обработки экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах, что позволило установить закономерности влияния процесса искусственного замораживания на локальные участки породного массива. Подчеркнуто, что для получения с максимальной точностью решения обратной задачи Стефана (с учетом отклонения замораживающих скважин от вертикали) необходимо располагать термометрическую скважину в точке с наименьшей температурой на прямой, проходящей посередине между замораживающими скважинами. Представлено обоснование всестороннего контроля за состоянием ледопородного ограждения, который обеспечивается количеством контрольно-термических скважин не менее 30 % от общего количества замораживающих скважин. Описана методика по определению оптимальных технологических параметров способа термометрического контроля состояния ледопородного ограждения. С использованием методики показано, что для выполнения надежного и точного прогноза состояния ледопородного ограждения достаточно трех контрольно-термических скважин на участке замораживания строящегося шахтного ствола.

**Пятая глава** посвящена технологическому и методическому обеспечению построения системы непрерывного и оперативного контроля состояния ледопородных ограждений.

Приводятся требования к параметрам системы термометрического контроля, изложена методика построения математической модели термодинамических процессов, происходящих в замораживаемом породном массиве. Дается описание возможностей разработанного программного обеспечения (программа «FrozenWall») для прогноза параметров состояния ледопородного ограждения. На примере рудника Талицкого ГОКа, разрабатывающего Верхнекамское месторождение калийных солей, продемонстрирована работоспособность автоматизированной системы термометрического контроля замораживаемого породного массива вокруг строящихся шахтных стволов. Отмечается, что внедренная система позволяет не только определять фактические параметры ледопородного ограждения, но и разрабатывать технически обоснованные мероприятия, которые направлены на обеспечение безопасности ведения горных работ и повышения показателей эффективности строительства шахтных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях.

**В Заключение** диссертации обобщены основные результаты, установленные Паршаковым О.С. в процессе работы и на базе которых сформулированы защищаемые положения.

**Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов.**

Автоматизированная система термометрического контроля состояния 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».

Разработанная автором автоматизированная система термометрического контроля состояния ледопородных ограждений может быть рекомендована к реализации на планируемых объектах добычи полезных ископаемых, например, в Калининградской области (Нивенский ГОК), в Республике Беларусь (Дарасинский рудник), в Пермском крае на потенциальных участках Верхнекамского месторождения калийных солей.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.**

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, а также обсуждением результатов исследований на российских и международных конференциях, публикациями в рецензируемых изданиях.

**Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению.**

В целом изложенный материал соответствует целевой установке и задачам диссертационного исследования. Выводы, сделанные по работе, отвечают поставленным целям и задачам. Разработанная с участием диссертанта система термометрического контроля ледопородных ограждений реализована на строящихся шахтных стволах рудников Петриковский ГОК ОАО «Беларуськалий», Нежинский ГОК ИООО «Славкалий» и Талицкий ГОК ЗАО «ВКК».

Диссертационная работа и автореферат хорошо оформлены, написаны грамотным научным языком. Содержат необходимые и качественные иллюстрации и литературные ссылки. Диссертация оставляет впечатление большой и серьезно проделанной работы, и имеющие место огрехи не умаляют ее достоинств.

### **К работе имеются следующие замечания.**

Расчет по формуле (1.1) на стр. 15 будет давать не просто количество теплоты, а количество теплоты в единицу времени.

На стр. 31 обсуждается влияние вертикальных тепловых потоков, вводится гипотеза об их малости. При этом дается ссылка на недоступный рецензентам материал (Теоретическое исследование процесса формирования ледопородного ограждения в слоистом обводненном массиве горных пород. — Отчет о НИР № 36.16 — Пермь. ИМСС УрО РАН. 2016. — 144 с. ). Представляется, что для природных геотермических градиентов используемая гипотеза справедлива. Вместе с тем, приведенные в диссертации графики вертикальных распределений температуры по контрольно-термическим скважинам (см. рис. 3.1, 3.8), свидетельствуют, что в процессе замораживания будут возникать ситуации (на отдельных участках) с более существенными температурными градиентами и вклад вертикальных тепловых потоков возрастет в разы.

На стр. 32 обсуждается вопрос о преимуществах декартовой сетки по сравнению с полярной. Основным аргументом выступает отклонение скважин от оси с увеличением глубины. Можно с этим согласиться, если решаешь задачу в объемной постановке. Однако, в рассмотренном автором случае задача решается послойно в двухмерной постановке, что исключает преимущества.

На стр. 37 в 1-м абзаце появляется обозначение  $T$  – безразмерная температура непо потревоженного массива. Ранее при обсуждении прямой задачи Стефана этот же символ описывал физическую температуру массива.

На стр. 67 на рис. 3.6 представлено модельное распределение температуры в слое песка на отметке -20,2 м, рассчитанное на 12.07.2018 г. В точках контроля имеем следующие температуры:  $TK1 \approx -6$  °С,  $TK2 \approx -2$  °С и  $TK3 \approx 0$  °С. На рис. 3.8 представлен пример динамики экспериментальных измерений распределенной температуры горных пород в контрольно-термической скважине. На дату 12.07.2018 г. на отметке около 20 м температура в какой-то точке контроля (нет указания) превышает 2 °С. Вроде бы нет соответствия с результатами модельного расчета на указанную дату. Остальные модельные расчеты к конкретным датам не привязаны.

На стр. 71 на рис. 3.9 представлены примеры распределения температуры в различных исследуемых слоях горных пород (а — с учетом наличия шахтного ствола, б — без ствола). Представляется, что было бы логичнее анализировать указанные ситуации в одном слое.

На стр. 67 и 71 (рис. 3.6, 3.9) представлены модельные распределения температур в области размером 30x30 м. Чтостораживает? В отсутствии данных по реальному размеру моделируемой области и указанному граничному условию (формула (2.5) на стр. 30) поведение изолиний вблизи границ не должно быть гладким (форма окружностей). Условие на границе должно было бы слегка «сплющить» изолинии. Как вариант объяснения – на указанных рисунках представлены вырезанные из большой площади фрагменты. Так ли это?

В диссертационной работе не хватает **Приложения**, где должны быть размещены копии документов, подтверждающих акты внедрения разработанной автоматизированной системы.

Тем не менее, указанные замечания не затрагивают сущности диссертационной работы Паршакова О.С., не влияют на общую положительную оценку работы, которую отличает целостность, фундаментальность подходов, профессиональное использование верифицированных программных продуктов и достоверность полученных результатов.

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации.**

Автореферат и публикации достаточно полно отражают основное содержание диссертационной работы. Для автореферата соискателем выбрана иная структура изложения работы. В автореферате выделяются три части. В «Общей характеристике работы» присутствует вся необходимая информация об актуальности работы, объектах исследования, цели и задачах, методах, научной новизне, практической значимости, публикациях, структуре и объеме работы, перечислены защищаемые положения, отмечен личный вклад автора. Далее следует раздел «Основное содержание работы», в котором полученные данные и выводы приводятся в соответствии с защищаемыми положениями. В «Заключении» отражены основные научные результаты. Приведен список работ диссертанта по теме диссертации.

**Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.**

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. Имеется свидетельство о государственной регистрации разработанной с участием диссертанта программы «FrozenWall» для ЭВМ № 2018666337.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Таким образом, диссертация Паршакова О.С. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно-практической задачи по разработке способа контроля состояния замораживаемого участка породного массива на основе данных термометрии скважин при строительстве шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. Разработанная и реализованная на ряде предприятий горной промышленности России и Республики Беларусь автоматизированная система термометрического контроля и прогнозирования состояния ледопородных ограждений направлена на исключение возникновения аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов способом искусственного замораживания.

Представленная диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Паршаков Олег Сергеевич** заслуживает присуждения искомой ученой степени **кандидата технических наук**.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Горной секции Горного института КНЦ РАН (протокол № 2-2020 от 07.09.2020 г.).

Председатель горной секции ГоИ КНЦ РАН,  
доктор технических наук  
тел. (8 815 55 79 301); E-mail: [nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru](mailto:nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru)

Наговицын О.В.

Ведущий научный сотрудник  
отдела «Геомеханики» ГоИ КНЦ РАН  
доктор технических наук  
тел. (8 815 55 79 570); E-mail: [kasp@goi.kolasc.net.ru](mailto:kasp@goi.kolasc.net.ru)

Каспарьян Э.В.

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории технологических процессов  
при извлечении полезных ископаемых ГоИ КНЦ РАН  
кандидат технических наук  
тел. (8 815 55 79 615); E-mail: [vosoma@goi.kolasc.net.ru](mailto:vosoma@goi.kolasc.net.ru)

Амосов П.В.

184209, г. Апатиты, Мурманской области, ул. Ферсмана, дом 24  
Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН)  
тел. (81555)79520, факс (81555)74625; [root@goi.kolasc.net.ru](mailto:root@goi.kolasc.net.ru)

Согласны на обработку персональных данных.