

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора РАН

Майорова Александра Евгеньевича на диссертационную работу Семина Михаила Александровича «Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Объем и структура диссертации. Диссертация представлена в виде специально подготовленной по требованиям ВАК РФ рукописи, которая состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 360 наименований, изложенных в общем на 313 страницах машинописного текста, содержит 118 рисунков и 47 таблиц. Автореферат диссертации изложен на 44 страницах и имеет объем около 2 печатных листов.

Во введении автор обосновывает выбор темы, четко формулирует цель, задачи, научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе (13-72 стр.) дан обширный литературный обзор по вопросам проектирования ЛПО и методов математического моделирования замораживания пород. Также рассмотрены вопросы организации мониторинга состояния ЛПО. Особо отмечена работа по анализу иностранных источников, которых около 2/3 от общего количества.

Во второй главе (73-105 стр.) сформулированы общие принципы и подходы к моделированию термогидромеханических процессов при искусственном замораживании пород, которые обосновано использованы в последующих главах. Предложено деление общей модели термогидромеханических процессов в замораживаемых породах на четыре субмодели, связанные между собой – термодинамическую, гидравлическую, аэрологическую и геомеханическую.

В третьей (106-146 стр.), четвертой (147-182 стр.), пятой (183-209 стр.) и шестой (210-246 стр.) главах поэтапно анализируется каждая из четырех субмоделей. Рассматриваются как собственные особенности этих субмоделей, так и особенности их взаимосвязи с остальными субмоделями. В каждой главе приводятся практические задачи, для решения которых применялись одна или несколько связанных между собой субмоделей.

Седьмая глава (247-283 стр.) посвящена вопросу проектирования систем термометрического мониторинга ЛПО, где преимущественно рассматриваются вопросы настройки параметров термодинамической субмодели по данным измерений температуры в контрольно-термических скважинах.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Актуальность темы исследования обусловлена важностью обеспечения высокопроизводительного, безопасного и эффективного ведения горных работ в процессе строительства шахтных стволов в сложных

гидрогеологических условиях на начальном этапе разработки месторождения твердых полезных ископаемых. При этом, обеспечение возведения герметичной системы крепления шахтного ствола с заданной устойчивостью приконтурной зоны массива горных пород, является актуальной практической задачей. Применительно к калийным рудникам специальные способы проходки практически безальтернативно ориентированы на использование технологии искусственного (рассольного) замораживания вмещающих пород, формирующего герметичное несущее ледопородное ограждение (ЛПО) вокруг строящейся горной выработки. Подходы, сформировавшиеся в России и за рубежом, привели к развитию приближенных методов как статического, так и теплотехнического расчетов ледопородных ограждений, что не соответствует уровню современных требований проектирования и безопасности в подземном строительстве. Очевидно, что для дальнейшего развития данного направления важно решение научно-технической задачи по разработке теоретических и технологических основ расчета процесса искусственного замораживания приконтурного массива пород, комплексно учитывающего уникальные взаимовлияющие физические и технологические параметры системы замораживания, термогидромеханических процессов в породном массиве и крепи ствола, аэрологических процессов в атмосфере ствола.

Учитывая важность для страны и перспективы развития калийной горнодобывающей отрасли, поставленная цель и задачи работы, направленные на обеспечение комплексной безопасности при ведении горных работ, целесообразны и актуальны.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, новизна.

Автором сформулировано шесть защищаемых научных положений, полностью раскрытых и доказанных во 2-7 главах диссертации (73-282 стр.), включающих: моделирование термогидромеханических процессов в породном массиве в условиях его искусственного замораживания; теплофизические факторы безопасности при проектировании ледопородных ограждений; гидрогеологические факторы безопасности при формировании ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов; аэрологические факторы безопасности при проходке стволов шахт способом искусственного замораживания; геомеханические факторы безопасности при определении требуемых толщин ледопородного ограждения; экспериментальный мониторинг состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов калийных рудников.

Диссертантом на защиту вынесено шесть научных положений, которые последовательно раскрываются и научно обосновываются в тексте рукописи. Выводы диссертационного исследования информативны, основаны на полученных в работе результатах теоретических и экспериментальных исследований.

Первое научное положение: «связанная математическая модель системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь горной выработки –

атмосфера горной выработки» с возможностью дифференцированного учета термогидромеханических и аэрологических процессов, протекающих при искусственном замораживании пород, позволяет проводить комплексный теоретический анализ состояния ледопородных ограждений». Новизна заключается в определении набора критериальных условий, при достижении которых возможен обоснованный переход от связанной термогидромеханической модели системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь горной выработки – атмосфера горной выработки» к более простым моделям, учитывающим отдельные физические процессы при искусственном замораживании пород и грунтов.

Второе научное положение: «определение технологических параметров систем замораживания посредством численного многопараметрического моделирования физических процессов в породном массиве и их оптимизации по критериям безопасности и энергоэффективности позволяет уменьшить сроки строительства горных выработок в сложных гидрогеологических условиях и обеспечить поддержание проектных параметров ледопородного ограждения в течение всего периода проходки, крепления и гидроизоляции шахтного ствола». Новизна заключается в выявлении основных функциональных зависимостей параметров ЛПО от технологических параметров системы замораживания, параметров теплопереноса в замораживаемом массиве горных пород, позволяющих сделать количественный анализ состояния ЛПО и его развития в будущем при различных штатных и аварийных ситуациях.

Третье научное положение: «количественная оценка обеспечения проектных параметров ледопородного ограждения в условиях высокой обводненности и гидравлической проводимости породного массива должна осуществляться на основании анализа закономерностей фильтрации подземных вод в замораживаемом породном массиве как в режиме вынужденной, так и в режиме свободной конвекции». Новизна заключается в определении условий возникновения частично-возвратных течений воздуха в строящемся стволе вследствие наличия температурного градиента, обусловленного низкой температурой окружающих замороженных пород. При этом произведена количественная оценка интенсификации теплообмена воздуха и крепи строящегося ствола при наличии частично-возвратных течений воздуха.

Четвертое научное положение: «параметры движения воздушных потоков в вертикальной строящейся горной выработке, рассчитанные с учетом наличия градиента температур и переменной плотности воздуха, позволяют повысить адекватность моделирования теплообмена между крепью ствола и воздухом и обеспечить надежное проветривание строящейся горной выработки». Новизна заключается в определении поправочных коэффициентов для аналитических зависимостей по расчету требуемой толщины ЛПО, позволяющих корректно учесть защемление на торцах ледопородного цилиндра, его температурную неоднородность, а также условие потери несущей способности ЛПО.

Пятое научное положение: «расчетные толщины ледопородных ограждений по критериям предельного равновесного состояния и предельных деформаций замороженных пород существенным образом зависят от таких физических факторов как вертикальная нагрузка вышележащих пород, напряженно-деформированное состояние окружающих незамороженных пород, фактическая неоднородность поля температур и фактические технологические параметры заходки». Новизна заключается в создании методики калибровки параметров модели тепловых процессов в породном массиве, обеспечивающей единственность решения обратной задачи и позволяющей добиться наилучшего согласования модельных и измеренных температур в контрольно-термических скважинах.

Шестое научное положение: «безопасность работ при строительстве горных выработок способом искусственного замораживания достигается за счет развертывания комплексной системы мониторинга теплового режима породного массива, крепи строящейся горной выработки и аэрологических параметров атмосферы горной выработки, обеспечивающей параметризацию связанной математической модели системы по данным экспериментальных измерений и повышающей достоверность анализа состояния ледопородного ограждения». Новизна заключается в определении технологических параметров системы термометрического мониторинга замораживаемого массива, крепи строящейся горной выработки и аэрологических параметров атмосферы горной выработки, позволяющих обеспечить более достоверное прогнозирование технического состояния ЛПО посредством взаимного уточнения результатов математического моделирования и экспериментальных измерений температуры в контрольно-термических скважинах.

Основные выводы и рекомендации обоснованы положительными результатами представительных натуральных исследований и качественной обработкой полученных данных, изложенных в диссертации, с применением следующих методов: сравнительного анализа и обобщения научного и практического опыта; математического моделирования с учетом результатов натуральных исследований динамики изменения температуры породного массива по глубине контрольно-термических скважин, температуры воздуха и крепи шахтных стволов, уровня подземных вод в гидрогеологических скважинах; статистической обработки экспериментальных данных; теоретического анализа закономерностей протекания различных физических процессов в замораживаемом породном массиве, мониторинга физического состояния объекта с применением прямых способов измерения.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректной постановкой и обоснованным решением в полном объеме поставленных шести задач исследования с применением апробированных классических методов и методик. Также, достоверность подтверждается сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натуральных экспериментов, соответствием приведенных результатов и выводов данным, полученным другими авторами; представительным объемом наблюдений, выполненных в натуральных условиях при проведении

мониторинговых исследований формирования ЛПО строящихся стволов на примере калийных рудников ОАО «Беларуськалий», ИООО «Славкалий», ЗАО «ВКК», ООО «ЕвроХимВолгаКалий».

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертации, заключается в:

- анализе и обобщении результатов известных теоретических и экспериментальных исследований в заявленной области, постановке и выполнении задач данного исследования, в разработке методик с проведением теоретических и экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, в обосновании и формулировке всех положений диссертационной работы;

- разработке и развитии методов математического моделирования термогидромеханических процессов на примере системы «замораживающие колонки – породный массив – крепь горной выработки – атмосфера горной выработки» при вскрытии вертикальным стволом участка калийного месторождения;

- определении основных технологических/проектных параметров системы замораживания массива горных пород, оптимизированных по критериям безопасности и энергоэффективности, с учетом выявленных при численном моделировании зависимостей теплофизических и геомеханических процессов, протекающих в течение всего периода проходки, крепления и гидроизоляции шахтного ствола;

- определении условий, при которых возможно формирование ЛПО проектных параметров в породном массиве с выраженной фильтрацией подземных вод при различных штатных и аварийных ситуациях;

- обосновании вентиляционных процессов, происходящих в горных выработках в условиях отрицательных температур крепи и окружающего замороженного породного массива, учитывающем особенности возникновения частично-возвратных течений воздуха и их влияние на тепломассоперенос в условиях строящегося ствола шахты;

- обосновании процессов изменения напряженно-деформированного состояния и устойчивости ЛПО шахтных стволов во времени в условиях различных внешних нагрузок;

- разработке и научном обосновании математических методов интерпретации данных скважинной термометрии, и обосновании технологических параметров систем мониторинга процесса искусственного замораживания пород.

Научное значение работы заключается

- в развитии методов математического моделирования взаимоувязанных термогидромеханических процессов в условиях высокой обводненности и гидравлической проводимости замораживаемого породного массива, и аэрологических процессов в ограниченном крепью пространстве строящейся вертикальной горной выработки. При этом, предложенные критериальные условия позволяют определить оптимальную точность моделирования термогидромеханических процессов в формирующемся ЛПО

исходя из желаемой скорости проведения расчетов, точности исходных данных и гидрогеологических особенностей рассматриваемого месторождения полезных ископаемых;

– в установлении устойчивых закономерностей фильтрации незамерзших подземных вод в поровом пространстве замораживаемого породного массива, с выделением трех различных режимов конвекции воды, влияющих на герметичность и физико-механические характеристики ЛПО, формируемого в процессе строительства вертикальной горной выработки;

Практическое значение работы заключается в совершенствовании и расширении области применения подходов/методов проектирования технологии замораживания горных пород и систем мониторинга технического состояния ЛПО и основных процессов его формирования на этапе строительства вертикального шахтного ствола при вскрытии и разработке месторождения твердых полезных ископаемых подземным способом. При этом, научно обоснованы методики и методы расчета основных параметров способа искусственного замораживания породного массива с применением рассольной схемы при строительстве шахтных стволов на примере вскрытия и отработки калийных месторождений.

Значимым результатом является повышение точности расчета технологических параметров систем замораживания горных пород, повышение достоверности прогнозирования параметров ЛПО и, как следствие, повышение безопасности ведения горных работ при строительстве шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях.

Система текущего термометрического контроля физического состояния ЛПО строящихся шахтных стволов запатентована и успешно реализована на руднике Петриковского ГОК и Дарасинском руднике ОАО «Беларуськалий», рудниках Нежинского ГОК ИООО «Славкалий» и Талицкого ГОК ЗАО «ВКК». Предложенные автором разработки позволяют в процессе текущего строительства принимать обоснованные решения по корректировке технологических режимов работы замораживающих станций, возможности начала проходки шахтного ствола только при достижении проектных значений сплошности и минимально допустимой толщины ЛПО.

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».

Завершенность работы, соответствие паспорту заявленной специальности, содержание автореферата и публикаций.

Диссертация имеет логически завершенную структуру, поскольку содержит все признаки законченного исследования: анализ и обобщение материалов литературных источников и технической документации; разработку методического обеспечения, адаптированного к поставленным задачам; формирование массива данных полученных результатов, их обработку, анализ и обобщение в виде научных положений и выводов;

разработку и реализацию практических рекомендаций, апробированных на реальных объектах.

Материалы диссертации изложены грамотно, с применением общепринятой научно-технической терминологии, оформлены в соответствии с существующими требованиями.

Существо диссертации и полученных результатов в полной мере соответствует паспорту специальности 2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Содержание автореферата полностью отражает структуру, содержание, основные положения и рекомендации диссертации.

Все основные результаты исследований с исчерпывающей полнотой изложены в 50 печатных работах, в том числе 33 публикации в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ, одна монография, 34 публикации в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science. Получен один патент, два свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ, издан один внутренний нормативный документ для горнодобывающего предприятия.

Замечания и вопросы по содержанию и оформлению диссертации.

1. В работе не указано, в каком диапазоне теплофизических свойств пород будут справедливы выведенные автором аппроксимирующие зависимости (3.9) и (3.10) для относительных земных теплоперетоков. Также, не очень удачен термин «земные теплоперетоки», под которым можно понять вертикальный тепловой поток от центра Земли к ее поверхности.

2. Из п. 4.4. не ясно почему из-за аномального порового давления в слое № 9 перетекание воды происходило именно в слой № 13, а не на дневную поверхность.

3. Не раскрыта причина представления аппроксимирующих зависимостей в виде константы (6.3) и в виде многочлена второго порядка (6.4). Как это обосновано физически?

4. Из полученной зависимости (6.21) следует, что с ростом высоты заходки h толщина ЛПО E стремится к постоянному значению. В то время как в формуле (1.11), полученной тоже для конечной высоты заходки, зависимость $E(h)$ имеет несколько иной, степенной характер, а толщина E неограниченно убывает с ростом h . С чем связана такая принципиально разная форма аналитических формул?

5. Не раскрыто влияние плотностной анизотропии реального массива с переменной проницаемостью и влажностью горных пород на процессы формирования ЛПО строящегося вертикального ствола и толщину ЛПО в соответствующих моделях и рекомендациях.

6. По материалам диссертации разработаны научные основы расчета параметров способа рассольного замораживания обводненных горных пород при проходке именно вертикального ствола шахты, что стоило отразить в основных положениях работы. Очевидно влияние угла наклона горной

выработки на течение во времени и пространстве рассматриваемых автором термогидромеханических и аэрологических процессов.

Приведенные выше замечания носят не принципиальный характер и не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение о соответствии диссертации установленным требованиям и критериям.

Диссертация Семина М.А., представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена научная проблема по обоснованию основных термогидромеханических и аэрологических процессов, методов расчета и мониторинга основных параметров при строительстве вертикальных шахтных стволов с применением способа рассольного замораживания приконтурного массива пород, обеспечивающая безопасность ведения горных работ при подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых, что имеет важное хозяйственное значение.

Диссертационная работа «Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород» выполнена на высоком научно-методическом уровне, обладает актуальностью и новизной, имеет научное значение и практическую ценность, полностью соответствует требованиям и критериям действующих положений ВАК Минобрнауки России, а ее автор, Семина Михаил Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией геомеханики и геометризации угольных месторождений ФИЦ УУХ СО РАН,

доктор технических наук по специальности 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная),

профессор РАН по направлению «Горные науки, горная инженерия и добыча полезных ископаемых».

Контактная информация:

650065, Россия, Кемерово, просп. Ленинградский, 10,

Институт угля СО РАН (структурное подразделение ФИЦ УУХ СО РАН)

телефон: +7(384 2) 74-15-57; e-mail: majorov-ae@mail.ru

11 апреля 2022 г.

/ А.Е. Майоров

Я, Майоров Александр Евгеньевич, автор отзыва, даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой

диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН (г. Пермь) и их дальнейшую обработку.

11 апреля 2022 г.

/ А.Е. Майоров

Подпись официального оппонента д.т.н., проф. РАН Майорова А.Е. удостоверяю. Заместитель директора по научно-организационной работе ФИЦ УУХ СО РАН, к.т.н., доцент

11 апреля 2022 г.



/ В.В. Зиновьев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН)

650000, Россия, Кемерово, просп. Советский, 18.

тел./факс (384-2) 36-34-62; e-mail: centr@coal.sbras.ru; <http://www.coal.sbras.ru>