

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Представленная на отзыв диссертационная работа общим объемом 313 страниц машинописного текста, состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 360 наименований, содержит 47 таблиц и 118 рисунков.

Актуальность темы диссертации

Строительство шахтных стволов в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях сопряжено с необходимостью использования специальных способов ведения горных работ, к числу которых относится искусственное замораживание грунтов и породных массивов. С помощью системы охлаждающих скважин вокруг предполагаемого места проходки ствола создаётся ледопородное ограждение (ЛПО), назначением которого является предотвращение поступления подземных вод в строящуюся выработку, а также укрепление стенок породного массива до возведения крепи. Необходимые для проходки ствола характеристики ЛПО, количество и расположение охлаждающих скважин, режимы работы холодильной установки, время установления требуемой прочности ЛПО определяются на основании предварительных расчётов.

Несмотря на хорошую изученность механики и термодинамики мёрзлых пород, представленную работами разных авторов в России и за рубежом, ограниченная мощность вычислительной техники в недалёком прошлом, привели к развитию приближённых методов моделирования динамики формирования ЛПО. Вычислительные возможности современных компьютеров, современное аппаратно-методическое обеспечение контроля термического режима, системы сбора и обработки информации позволяют не только значительно повысить точность моделирования и прогноза, но и решать проблему комплексно, в рамках единой технологии, обеспечивая экономическую эффективность и безопасность строительства шахтных

стволов. Научные основы такой технологии заложены в рассматриваемой диссертации М.А. Семина.

Актуальность работы подтверждается и планами крупнейших горнодобывающих предприятий России и Белоруссии по строительству новых калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях. Это означает востребованность разработанной технологии и в будущем.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе

При выводе и обосновании *первого научного положения* соискатель разработал комплексную математическую модель, описывающую процессы тепломассопереноса в замораживаемом породном массиве, замораживающих колонках и крепи шахтного ствола, учитывающую аэрологические процессы в атмосфере строящегося шахтного ствола. Упрощение модели с целью приведения к расчётному виду проведено путём разделения её на четыре взаимосвязанных субмодели процессов разной физической природы – механическую, термодинамическую, гидравлическую и аэрологическую, с определением условий корректности проведённой декомпозиции. Верификация модели проводилась сравнением расчетов с результатами натурных изменений температуры в контрольно-термических скважинах при строительстве стволов рудника Петриковского ГОКа и с результатами лабораторных исследований других авторов.

При обосновании *второго научного положения* рассмотрена динамика теплового поля породного массива, определяющая его прочностные и влажностные свойства, а также температура и движение контактирующего с ним воздуха в строящемся стволе. Проведён анализ аспектов проектирования систем искусственного замораживания, связанных с выбором энергоэффективных параметров хладоносителя для обеспечения несущих и гидроизоляционных свойств ЛПО и оптимальной геометрической конфигурации системы замораживающих колонок. Смоделирована динамика ЛПО в фазе пассивного замораживания в аварийном режиме работы системы замораживания, например, связанным с выходом из строя одной из замораживающих колонок.

Третье научное положение доказывается с помощью термогидравлического подхода к моделированию движения поровых вод во время замораживания массива. Оценены особенности формирования ЛПО в условиях фильтрации подземных вод. Горизонтальная фильтрация приводит

к искажению формы ледяного цилиндра, и при высоких скоростях может привести к потере сплошности ЛПО.

Проведено исследование влияния естественной конвекции подземных вод на процесс искусственного замораживания породного массива, в ходе которого установлено, что при переходе на пассивный режим замораживания и повышении температуры хладоносителя происходит резкий рост максимальной скорости фильтрации поровых вод. Полученные результаты позволили объяснить аномальное поведение распределения температур в контрольных скважинах строящегося скипового ствола Дарасинского рудника.

В четвертом научном положении автор аргументирует необходимость учёта теплообменных процессов между породным массивом строящегося ствола и воздухом. Значительный перепад температур между воздухом и замороженным массивом увеличивает риск возникновения тепловой конвекции в стволе, что имеет негативные последствия – увеличение коэффициента теплообмена, ведущее к более интенсивному нагреву и оттаиванию массива, и проникновение холодных воздушных масс в рабочую призабойную зону. Сопряженный анализ теплообменных процессов в замороженном породном массиве и воздухе, движущемся по шахтному стволу, позволил установить зависимость для оценки влияния теплового потока со стороны воздуха на положение фронта фазового перехода в породном массиве внутри контура замораживания, которая была протестирована на калийном руднике Гремячинского ГОКа.

Достоверность пятого научного положения подтверждается результатами исследований зависимости толщины ЛПО по условию ползучести от двух факторов - вертикальной нагрузки на ЛПО и неоднородности поля температуры. С помощью численного решения сопряженной термомеханической задачи проведен анализ корректности классического приближения однородности распределения температур и прочностных свойств в объеме замороженных пород. Установлено, что статический расчет ЛПО с учетом неоднородного поля температур приводит к более высокому значению толщины ЛПО, чем для поля однородного. Получена зависимость для расчета требуемой толщины ЛПО с учетом неоднородности поля прочностных свойств в его объеме, деформирования окружающих незамороженных пород и конечной высоты заходки.

Достоверность шестого научного положения подтверждена в ходе проведения экспериментального мониторинга температуры при формировании ЛПО на ряде строившихся калийных рудниках. Проведён анализ наименее изученных сторон мониторинга искусственного

замораживания пород, таких как выбор мест расположения и количества контрольно-термических скважин и интерпретации поля температур в породном массиве по данным измерений в скважинах и показаний датчиков системы замораживания. Калибровка теплофизических параметров замораживаемого массива реализована в работе на основе решения обратной задачи Стефана. Откалиброванная математическая модель реализована при непосредственном участии автора в программе «Frozen Wall», которая является одним из основных компонентов системы мониторинга и контроля процессов формирования и состояния ЛПО шахтных стволов рудника Нежинского ГОКа.

Научная новизна работы

Соискателем получены и представлены в диссертационной работе следующие результаты, содержащие элементы научной новизны:

- предложены критерии упрощения единой термогидромеханической модели ЛПО с теоретического до прикладного уровня для проведения технических расчётов;
- смоделирована динамика формирования ЛПО в зависимости от естественных и технологических условий замораживания, что позволяет осуществлять прогнозирование состояния ЛПО как в штатном, так и в аварийном режимах;
- оценена степень интенсификации теплообменных процессов между воздухом и породным массивом при возникновении свободной тепловой конвекции;
- проведена корректировка аналитических соотношений для расчёта требуемой толщины и условий потери несущей способности ЛПО с учетом температурной неоднородности массива;
- разработана методика калибровки параметров расчётной модели по данным наблюдений в контрольно-термических скважинах, позволяющая сделать обоснованный выбор из множества решений обратной задачи;
- усовершенствована система термометрического мониторинга породного массива, что позволяет осуществлять более точный прогноз состояния ЛПО путём комплексной обработки экспериментальных и расчётных данных.

Как отдельный научный результат можно отметить очень подробный и глубокий анализ текущего состояния и изученности проблемы. Автор коснулся здесь всех аспектов разрабатываемой темы, включая существующие теоретические и практические методы расчета параметров

ЛПО, вопросы моделирование термогидромеханических процессов в замораживаемых породах, исследования аэрологических процессов в строящихся горных выработках, методы экспериментального контроля состояния ЛПО. На основании этого анализа четко и конкретно сформулированы цель и задачи исследования. Результаты этого анализа опубликованы в виде монографии Семин М.А., Левин Л.Ю. Методы расчета искусственного замораживания пород при строительстве шахтных стволов. — М.: Научный мир, 2021. — 152 с.

Практическая ценность работы:

Представленные в диссертации математические модели реализованы численно в виде разработанного программного обеспечения и используются для проведения технических расчетов с использованием данных термометрического контроля, на основании которых может осуществляться прогноз формирования ледопородного ограждения перед строительством шахтного ствола. Система термометрического контроля ЛПО запатентована и успешно внедрена на калийных рудниках в Пермском крае и республике Беларусь. Полученные в работе результаты исследований включены в Инструкцию по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий».

Разработанные автором математические модели и алгоритмы расчета характеристик теплопереноса могут найти применение далеко за пределами проблемы, решаемой в диссертации, — в гидрогеологических, геокриологических, инженерно-геологических исследованиях.

Замечания по работе:

1. Некоторая путаница – терминологическая, в обозначениях, в размерностях. Удельная теплота фазового перехода: σ (с.27) и L (с. 36, 76, 106 и др.). С.34, ф-ла 1.47 - здесь плотность (в тексте – удельный вес) обозначена как γ , в других местах – ρ .

С.45-46. Здесь теплопроводность обозначена буквой k , в других местах – λ .

С.106. «Параметр Ψ рассчитывается как отношение суммарных земных теплопритоков $Q_{\text{ЗЕМ}}$ (Дж) на границе ЛПО к теплосодержанию ЛПО $Q_{\text{ЛПО}}$ (Дж)». Что такое теплоприток? По размерности – это количество тепла. Но из формулы 3.2 следует, что $Q_{\text{ЛПО}}$ имеет размерность Дж/кг, а $Q_{\text{ЗЕМ}}$ рассчитывается по ф-ле 1.47 для потока (Вт/м²). При этом у меня нет сомнений, что в расчетах все размерности были согласованы.

Следовало предварить диссертацию таблицей принятых обозначений и в дальнейшем сохранять их единство.

2. Во многих подрисуночных подписях нет ссылки на литературные источники, откуда они взяты (напр., рис. 1.6 и др.). Такие ссылки можно найти (скорее догадаться, что это они) в тексте.

3. При рассмотрении вопроса погрешности измерений температуры в КТ скважинах, обусловленной свободной тепловой конвекцией в рассоле, цитируются работы [30, 31], С.65 и 268, в которых приведены выражения, описывающие амплитуду конвективного шума «в терминах числа Грасгофа». Здесь автор ошибся. В цитируемых работах $\sigma = kGr$, где Gr – не число Грасгофа, а произведение термического градиента на радиус скважины.

4. Вызывает сомнение целесообразность введения обобщающих критериев типа К1 (минимальная толщина ЛПО по периметру) и К2 (максимальное изменение температуры, вызванное наличием фильтрационного течения подземных вод) - С. 149- 152, - и других подобных критериев, введенных ранее. Такое упрощение – всегда потеря информации. На мой взгляд, пространственные картины процессов замораживания и поддержания ЛПО имеют большую ценность. По этим картинам судить о процессе и вероятности возникновения аварийных ситуаций куда проще и нагляднее. Если же автор, вводя эти упрощения, преследовал цель формализации управления, то для анализа пространственных картин можно было использовать алгоритмы распознавания образов.

5. С.97, рис. 2.10. Почему температура хладоносителя обратного хода на устье не зависит от скорости прокачки?

6. С.116, ф-ла 3.18. Здесь рассмотрен наиболее простой способ - пропорционального регулирования. Но рассматриваемая регулируемая система весьма сложна и инерционна. Было бы целесообразно исследовать и другие, возможно, более эффективные способы регулирования в рамках теории систем автоматического управления – САУ. А в качестве управляющего воздействия рассматривать не изменение температуры хладоносителя, а, например, изменение энергопотребления холодильной установки и насосов.

7. С.129. Анализ уменьшения толщины ЛПО в пассивной фазе замораживания. Так как в пассивном режиме температура хладоносителя изменяется программно как раз с целью поддержания постоянной толщины ЛПО, то какой смысл имеет этот и следующий раздел (3.4)? Если можно оперативно изменить режим пассивного замораживания в аварийном случае.

8. С. 136-144. Здесь использован термин «водопроводящий слой», хотя речь не идет о фильтрации воды в этом слое. Лучше использовать термин «водонасыщенный слой».

Заключение

Автор поставил перед собой весьма трудоемкую и амбициозную задачу – разработку от А до Я наукоемкой технологии управления созданием ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов в сложных геологических и гидрогеологических условиях. Технология включает математические модели всех процессов тепломассопереноса, которые встречаются (или даже могут встретиться в будущем) в практике создания ЛПО, температурный мониторинг породного массива, основанный на инновационных распределенных оптоволоконных системах, сбор и оперативную обработку информации с одновременной калибровкой моделей, прогноз и выработку управляющих воздействий. Естественно, решение такой комплексной проблемы не может быть однозначным и всегда оставляет дискуссионные вопросы. Неизбежны и технические упущения. Именно такой, дискуссионный и технический характер, носят высказанные мной замечания, которые ни в коей мере не снижают качества и значимости диссертационной работы.

Диссертация и автореферат написаны хорошим, технически грамотным языком. Результаты исследований проиллюстрированы таблицами, графиками, формулами. Автореферат полностью соответствует материалу, изложенному в диссертационной работе. Основные результаты опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертационная работа Семина Михаила Александровича «Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, полностью отвечает требованиям ВАК, является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема - разработаны теоретические и технологические основы расчета искусственного замораживания породного массива при строительстве шахтных стволов, направленные на обеспечение комплексной безопасности при ведении горных работ, имеющая важное практическое значение.

Автор диссертационной работы, Семин Михаил Александрович заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по

специальности: 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Институт геофизики им. Ю.П.
Булашевича Уральского отделения Российской
академии наук, доктор-геолого-
минералогических наук



Демежко Дмитрий Юрьевич

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100,
Институт геофизики УрО РАН
(<http://igfuoran.ru>), Тел: +7-904-164-3625, e-
mail: ddem54@inbox.ru

