

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 09.12.2021 № 84

О присуждении Желнину Максиму Сергеевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании» по специальности 1.1.8 (01.02.04) «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 07.10.2021, протокол № 80, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Желнин Максим Сергеевич 1993 г. рождения, в 2017 г. окончил ФГБОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по направлению «Математика». В 2021 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории механики функциональных материалов ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в ИМСС УрО РАН – филиале ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук".

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор РАН, заместитель директора по научной работе ИМСС УрО РАН Плехов Олег Анатольевич.

Официальные оппоненты:

1. Пермяков Петр Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны ФГБУН "Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук" (г. Якутск);
2. Шилько Евгений Викторович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией компьютерного конструирования материалов ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук" (г. Томск);
дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, в своем положительном заключении,

подписанным директором Высшей школы теоретической механики Физико-механического института СПбПУ д.ф.-м.н., членом-корреспондентом РАН А.М.Кривцовым и д.ф.-м.н., профессором В.А.Кузькиным, и утвержденном и.о. проректора по научно-организационной деятельности ФГАОУ ВО СПбПУ, д.т.н., доцентом Ю.С. Ключковым, указала, что диссертация является завершённой научно-квалификационной работой по актуальной теме механики деформируемого твёрдого тела, имеющей значение для развития механики связанных задач и моделей механического поведения замороженных грунтов. Содержание и структура диссертации обладают внутренним единством и соответствуют поставленной цели исследования. Результаты научных исследований, выполненных автором, обладают научной новизной, имеют теоретическую и практическую значимость, а выдвигаемые соискателем положения и сформированные выводы являются обоснованными и достоверными. Представленная диссертационная работа «Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Желнин Максим Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (01.02.04) – Механика деформируемого твёрдого тела.

Соискателем опубликовано 18 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Zhelnin M.**, Kostina A., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. Numerical analysis of application limits of Vyalov's formula for an ice-soil wall thickness // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2019. – Vol.13. – No. 49. – P.156-166.

В статье представлены результаты теоретического анализа формулы Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. для оценки толщины ледопородного ограждения по критерию предельно допустимого перемещения на основе численного моделирования деформирования ледопородного цилиндра.

2. Kostina A., **Zhelnin M.**, Plekhov O., Panteleev I., Levin L., Semin M. An applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2020. – Vol. 14. – No. 53. – P.394-405.

Выполнен сравнительный анализ оценок толщин ледопородного ограждения, определенных по формулам Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. и по предложенным аппроксимационным зависимостям.

3. **Желнин М.С.**, Костина А.А., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Семин М.А., Агутин К.А. Верификация термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта на основе лабораторных экспериментов // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2021. – Т. 14, №2. – С. 144-158.

В работе представлена термогидромеханическая модель промерзания грунта, позволяющая рассчитать его деформирование в результате льдообразования из поровой влаги и криогенной миграции влаги.

4. **Желнин М.С.**, Прохоров А.Е., Костина А.А., Плехов О.А. Экспериментальное и теоретическое исследование механических деформаций в промерзающем влагонасыщенном грунте // *Вестник Пермского национального исследовательского*

политехнического университета. Механика. 2019. – № 4. – С.19-28.

Представлена термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта, учитывающая наличие незамороженной влаги при отрицательной температуре и морозное пучение, вызванное льдообразованием.

5. Prokhorov A., Kostina A., **Zhel'nin M.**, Plekhov O. Experimental investigation of physical and mechanical properties of processes accompanied with phase transition in water-saturated soil // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 28. – P.1579-1589.

В статье представлены результаты термогидромеханического моделирования лабораторного эксперимента по искусственному замораживанию песчаного грунта.

6. **Zhel'nin M.S.**, Kostina A.A., Plekhov O.A., Levin L.Y. Numerical simulation of vertical shaft sinking using artificial ground freezing //E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 266. – P.03008.

В статье представлены результаты применения термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенных грунтов для крупномасштабного моделирования изменения природного напряженно-деформированного состояния слоя алевритистого грунта, вызванного морозным пучением и криогенной миграцией влаги при искусственном замораживании на месторождении калийных солей, и деформирования шахтной выработки, пройденной под защитой ледопородного ограждения.

7. **Zhel'nin M.S.**, Kostina A.A., Plekhov O.A. Variational multiscale finite-element methods for a nonlinear convection–diffusion–reaction equation // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2020. – Vol. 61. – No. 7. – P.81-92.

В статье представлены стабилизированные методы конечных элементов для решения нестационарных уравнений тепло- и массопереноса, описывающих падение температуры с учетом выделения скрытой теплоты фазового перехода и криогенной миграции влаги в промерзающих грунтах.

8. Panteleev I., Kostina A., **Zhel'nin M.**, Plekhov O., Levin L. Intellectual monitoring of artificial ground freezing in the fluid-saturated rock mass // Procedia Structural Integrity. – 2017. – Vol. 5. – P. 492-499.

В статье представлены результаты крупномасштабного термогидромеханического моделирования формирования ледопородного ограждения в слоистом породном массиве способом искусственного замораживания.

9. Panteleev I., Kostina A., **Zhel'nin M.**, Plekhov O., Levin L. Numerical model of fluid-saturated rock mass with phase transitions as a theoretical basis for artificial ground freezing control system // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. 2018 European Rock Mechanics Symposium, Saint-Petersburg, Russia, May 22-26, 2018. – CRC Press, 2018. – P. 1273-1278.

В статье представлены результаты анализа данных температурного мониторинга, проведенного во время искусственного замораживания породного массива на месторождении калийных солей, на основе крупномасштабного численного моделирования с использованием термогидромеханической модели.

10. **Желнин М.С.**, Плехов О.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива в процессе искусственного замораживания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 56-75.

В работе представлены результаты численного моделирования процесса теплопереноса в искусственно замораживаемом грунтовом слое с учетом выделения скрытой теплоты фазового перехода при кристаллизации воды.

11. Semin M.A., Zaitsev A.V., Parshakov O.S., **Zheltnin M.S.** Substantiation of technological parameters of thermal control of the frozen wall // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2020. – Vol. 331. – No.9. – P.215-228.

В работе представлены результаты решения задачи теплопроводности в искусственно замораживаемых породных слоях с учетом выделения скрытой теплоты фазового перехода при кристаллизации воды.

12. **Zheltnin M.S.**, Plekhov O.A., Levin L.Y. Optimization of the passive regime of artificial freezing of a water-saturated rock mass // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol.93. – No.3. – P.685-692.

В работе представлены результаты расчета поля температуры в искусственно замораживаемых породных слоях с учетом выделения скрытой теплоты фазового перехода при кристаллизации воды.

13. Semin M.A., Levin L.Y., **Zheltnin M.S.**, Plekhov O.A. Natural convection in water-saturated rock mass under artificial freezing // Journal of Mining Science. – 2020. – Vol.56. – No.2. – P. 297-308.

В работе представлены результаты численного моделирования процессов теплопереноса и массопереноса в искусственно замораживаемом слое грунта.

14. **Zheltnin M.S.**, Plekhov O.A., Levin L.Y. Modeling the thermal response of a cast-iron–concrete system under active thermal non-destructive control // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2019. – Vol. 11. – No. 5. – P.831–841.

В работе представлены результаты численного моделирования целостности слоистой системы чугуна-бетон, имитирующей тубинговую чугунно-бетонную крепь вертикального шахтного ствола во влагонасыщенном породном массиве.

15. **Zheltnin M.**, Kostina A., Plekhov O., Levin L. Numerical simulation of cement grouting of saturated soil during a mine shaft sinking using the artificial ground freezing // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol.28. – P.693-701.

В работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния тубинговой чугунно-бетонной крепи и окружающего искусственно замороженного слоя грунта.

16. Kostina A., Zheltnin M., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. Numerical simulation of freezing pipe deformation during artificial ground freezing // Procedia Structural Integrity. – 2019. – V.18. – P.293-300.

В работе представлены результаты применения термогидромеханической модели к расчету напряженно-деформированного состояния искусственно замораживаемых грунтовых слоев.

17. **Zheltnin M.**, Kostina A., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. Numerical simulation of soil stability during artificial freezing // Procedia Structural Integrity. – 2019. – V.17. – P.316-323.

В статье на основе термогидромеханического моделирования искусственного замораживания грунтовых слоев показано, что морозное пучение приводит к объемному расширению грунта в замороженной зоне и сжатию незамороженного грунта.

18. Kostina A., **Zhelnin M.**, Plekhov O., Panteleev I., Levin L. Creep behavior of ice-soil retaining structure during shaft sinking // Procedia Structural Integrity. – 2018. – Vol. 13. – P.1273-1278.

В статье представлены результаты численного моделирования одноосных испытаний на ползучесть образцов замороженного грунта и деформирования ледопородного цилиндра конечной высоты.

Публикации содержат в сумме 190 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Пермякова П.П. В отзыве отмечается, что тема диссертации является актуальной, положения, вынесенные на защиту, проверены в лабораторных и натуральных условиях и не вызывают сомнений, полученные результаты являются новыми, актуальными и имеют высокую научную и практическую значимость. Оппонент отмечает следующие замечания:

- Следует проверить работоспособность модели при циклическом промерзании – протаивании;
- Каким образом предложенная модель будет описывать замораживание ненасыщенных грунтов.

2. Положительный отзыв официального оппонента Шилько Е.В. В отзыве указано, что диссертация посвящена построению связанной математической модели термогидромеханического поведения флюидонасыщенных грунтов с учетом перехода поровой жидкости в твердофазное состояние, а ее результаты вносят важный вклад в развитие актуального направления механики деформируемого твердого тела – механики влагонасыщенных промерзающих грунтов. Оппонент отмечает следующие замечания:

- При формулировании оригинальной модели диссертант выбрал некоторые весьма спорные упрощения: пренебрежение содержанием примесей в поровой воде, отсутствие учета формирования ледяных шлиров.
- Недостаточно обоснованным представляется использование нескольких (двух) предельных поверхностей для учета: (а) неупругой деформации замороженного/промерзающего грунта вследствие фазового перехода поровой воды (морозное пучение); (б) неупругой деформации вследствие внешних нагрузок.
- Поскольку микроскопические механизмы, которые реализуют ползучесть, являются теми же самыми, что и механизмы, реализующие пластичность, требует отдельного обоснования применение для замороженного грунта модели ползучести, не учитывающей объемные изменения. Возможно, в режимах ползучести и пластичности различны вклады от микромеханизмов, определяющих шаровую и девиаторную части неупругой деформации?
- Требуется дополнительное обоснование выбор ассоциированных моделей пластичности и ползучести замороженных грунтов.
- Представленные задачи и тестовые расчеты, для решения которых применена новая модель, фактически являются одномерными. В то же время в диссертации хотелось бы увидеть результаты использования модели в трехмерных по сути задачах.

- В ряде расчетов при моделировании объектов цилиндрической формы осесимметричная задача заменяется задачей на прямоугольных образцах. В то же время в других расчетах решается осесимметричная задача. Чем объясняется такое различие в подходах к решению различных задач, предполагающих осевую симметрию.
- Из рисунка 4.5 не очевидна сеточная сходимость численных результатов при масштабировании размеров элементов.
- Возможно, нестыковки данных мониторинга уровня подземных вод и температурных профилей объясняется гидрологической связанностью пластов, а не вариацией многочисленных параметров модели в разделе 4.2.
- В тексте диссертации, к сожалению, во многих местах встречаются орфографические и синтаксические ошибки. Также имеют место быть ошибки в написании отдельных формул, например, формул (2.2), (2.5), (2.39). Иногда используются переменные, определения которых не приведены или приведены позже.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, направленную на решение актуальной задачи прогноза напряженно-деформированного состояния влагонасыщенных грунтов в условиях искусственного замораживания. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость – разработан подход к численному моделированию искусственного замораживания обводненного грунтового слоя и неупругого деформирования шахтной выработки на стадии проходческих работ под защитой ледопородного ограждения. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- В работе содержится недостаточно сведений о том, как разработанная модель описывает процессы, возникающие в зоне промерзания, заключенной между замороженной и незамерзшей зоной.
 - Насколько предположение об отсутствии воздушной фазы влияет на пределы применимости используемой модели?
 - Достаточно ли степенного закона ползучести (соотношение 2.29) для расчета деформирования стенки шахтной выработки?
 - В тексте ограничения на применение уравнения (2.30) в явном виде не представлены.
 - В уравнении (2.39) отсутствует правая часть.
 - В связи с какими допущениями модели в численном решении, представленном на рисунке 3.1 не наблюдается «горизонтального участка», имеющегося на экспериментальных данных?
 - Несовпадение эмпирических данных с численным экспериментом на рисунке 3.4 на высоте 40мм вызвано неким процессом, идущим на данной высоте, или погрешностью экспериментальных данных?
 - Совпало ли рассчитанное время числом с тем, что было получено в эксперименте, при сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными (рисунок 4.3 (а), (в))? Почему график для алевролита не выходит на стационарное значение?
9. Чем можно объяснить разрывы в распределении среднего эффективного напряжения (рисунки 4.17 и 4.18)? Какое изменение модели могло бы их устранить?

На автореферат поступило 8 отзывов:

1. Положительный отзыв от Балоханова Р.Р., д.ф.-м.н., заведующего лабораторией механики структурно-неоднородных сред; Романовой В.А., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории механики структурно-неоднородных сред, ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (без замечаний);
2. Положительный отзыв от Богомолова Л.М., д.ф.-м.н., директора ФГБУН "Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН", г. Южно-Сахалинск (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Брагова А.М., д.т.н., профессора, главного научного сотрудника НИИ механики ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского"; г. Нижний Новгород (2 замечания);
4. Положительный отзыв от Вознесенского А.С., д.т.н., профессора, профессора кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»", г. Москва (1 замечание);
5. Положительный отзыв от Дамаскинской Е.Е., к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории физики прочности ФГБУН "Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН", г. Санкт-Петербург (1 замечание);
6. Положительный отзыв от Деменкова П.А., д.т.н., доцента, декана строительного факультета ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный университет", г. Санкт-Петербург (2 замечания);
7. Положительный отзыв от Карева В.И., д.т.н., заместителя директора по научной работе ФГБУН "Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН", г. Москва (2 замечания);
8. Положительный отзыв от Лепова В.В., д.т.н., директора Института физико-технических проблем Севера им. В.П.Ларионова, ФГБУН ФИЦ "Якутский научный центр СО РАН", г. Якутск (3 замечания);
9. Положительный отзыв от Люкшина Б.А., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой механики и графики ФГБОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"; Панина С.В., д.т.н., профессора РАН, профессора отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"; г. Томск (2 замечания);
10. Положительный отзыв от Смолина И.Ю., д.ф.-м.н., доцента, заведующего лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем, ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (2 замечания).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- Как проводилась температурная компенсация показаний волоконно-оптического датчика, используемого в эксперименте по замораживанию песка?
- Из формулы (10) в автореферате неясно от каких факторов зависит параметр ζ .
- Ссылки на российские журналы, в которых опубликованы результаты работы, желательно указывать в двух транскрипциях: русской и английской.
- При представлении экспериментальных данных хотелось бы видеть результаты повторных экспериментов.

- Было бы целесообразней, если бы автор сформулировал научные положения в форме утверждений, а не результатов.
- Анализировалось ли влияние дефектов типа трещин и границ раздела на несущую способность замороженных грунтов? Можно ли модифицировать модель, чтобы учесть влияние дефектов?
- Приведенная в автореферате формулировка одного из пунктов научной новизны: «Проведен анализ влияния...» не совсем удачно, так как анализ не может быть новизной.
- Для кандидатской диссертации можно было бы ограничиться тремя защищаемыми положениями.
- В автореферате отсутствует соотношение для расчета льдонасыщенности.
- Как получены распределения пористости и среднего эффективного напряжения на рисунках 5, 7?
- Насколько хорошо пакет Comsol Multiphysics® позволяет преодолеть проблему поиска оптимальных значений пространственной и временной сетки для получения устойчивого и точного численного решения. Насколько точность полученных решений зависит от параметров связности, пространственной сложности, граничных и начальных условий? Проводился ли такой анализ в достаточно широком диапазоне параметров модели?
- Применима ли модель в условиях значительных температурных перепадов, очень низких температур, для моделирования протаивания влагонасыщенных пористых грунтов?
- В работе имеются незначительные грамматические ошибки.
- В автореферате отсутствует информация о типах применяемых конечных элементов и параметрах конечно-элементной сетки, используемой в расчетах.
- На рисунке 12 не указана размерность представленных перемещений.
- Выражение "трехмерная математическая модель" представляется неудачным.
- Положения 3 и 4, выносимые на защиту, можно логически объединить в единое.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики деформируемого твердого тела, имеют публикации по созданию математических моделей пластического деформирования и разрушения горных пород, промерзания влагонасыщенных грунтов в рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация Высшая школа теоретической механики Физико-механического института СПбПУ является одним из ведущих научных центров в

области механики деформируемого твердого тела. В нем активно ведутся фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в области механики деформируемого твердого тела, механики пористых сред и сред с микроструктурой. Разрабатываются численные схемы и алгоритмы решения связанных задач пластического деформирования и разрушения геоматериалов с учетом воздействия температуры и порового давления.

Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании научного семинара Высшей школы теоретической механики в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта, позволяющая рассчитывать изменение его напряженно-деформированного состояния в результате криогенной миграции влаги и образования порового льда;

предложен алгоритм численного решения разработанной модели с использованием пакета конечно-элементного моделирования, позволяющий выполнять расчет процесса искусственного замораживания грунтов в реальных геотехнических приложениях;

доказана необходимость учета криогенных процессов и неупругого деформирования грунта для расчета прочности ледопородных ограждений;

введены новые аналитические соотношения для оценки безопасной толщины ледопородного ограждения в зависимости от бокового давления.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **предложена** модификация подходов к моделированию пористых сред, позволившая описать эффекты образования неоднородного распределения льдистости при формировании ледопородного ограждения;

– **установлено** влияние морозного пучения, возникающего при формировании ледопородного ограждения, на сжатие и изменение пористости незамороженного грунта;

– **доказано** влияние криогенной миграции влаги на образование локализованных зон сжатия вблизи фронта промерзания в искусственно замораживаемом грунтовом слое и между соседними замораживающими скважинами.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы подходы теории насыщенных пористых сред для разработки уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние, тепло- и массоперенос в промерзающих грунтах, экспериментальные методы исследования деформирования грунтов. Для компьютерного моделирования использовался метод конечных элементов, реализованный в рамках модифицированных и оригинальных алгоритмов в программном комплексе Comsol Multiphysics. Для измерения деформаций в промерзающем грунте применялся разработанный соискателем оптоволоконный датчик деформации с решеткой Брэгга;

изложены результаты решения задач изменения температуры, пористости и механического поведения искусственно замораживаемых грунтов (супесь, глина, алевролит, песок), а также результаты расчетов деформирования шахтной выработки, пройденной под защитой ледопородного ограждения в слоях алевролита, песка, глины, мела;

раскрыты физические механизмы формирования неравномерного распределения пористости в искусственно замораживаемом грунте и увеличения порового давления внутри растущего ледопородного ограждения;

изучено влияние криогенных процессов на напряженно-деформированное состояние замораживаемых грунтовых слоев и радиальное перемещение стенки шахтной выработки;

проведена модернизация формул Ю.К. Зарецкого и С.С. Вялова для определения проектной толщины ледопородного ограждения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в инструкцию по строительству вертикальных шахтных стволов новые аппроксимационные соотношения для расчета безопасной толщины ледопородного ограждения в зависимости от бокового давления;

определены пределы применимости существующих инженерных методик по проектированию проходки шахтных стволов способом искусственного замораживания;

создан комплексный подход к исследованию формирования ледопородного ограждения в обводненном грунтовом слое и процесса неупругого деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки, включающий в себя цифровой двойник объекта и перечень необходимых экспериментов для его верификации;

представлены результаты применения созданного подхода к исследованию проходки шахтного ствола на руднике Петриковского горного обогатительного комбината способом искусственного замораживания.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ использованы аттестованное испытательное оборудование и поверенные средства измерений, обеспечена устойчивая воспроизводимость результатов, учтены рекомендации действующих стандартов;

теория основана на известных уравнениях механики сплошных сред, теории промерзающих и мерзлых грунтов, результаты решения тестовых задач хорошо соответствуют известным экспериментальным данным;

идея построения термогидромеханической модели **базируется** на анализе и обобщении результатов теоретических и экспериментальных исследований механического поведения насыщенных пористых сред в условиях замораживания поровой жидкости;

использован метод конечных элементов, реализованный в апробированном программном комплексе, для которого доказана практическая сходимость для рассматриваемых задач;

установлено качественное и количественное соответствие результатов моделирования с данными лабораторных экспериментов, представленными в литературе, и полученными при непосредственном участии автора, а также с измерениями, выполненными в ходе мониторинга состояния ледопородного ограждения на Петриковском месторождении.

