

На правах рукописи



Желнин Максим Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ГРУНТОВ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ**

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в «Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»).

Научный руководитель: **Плехов Олег Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты: **Шилько Евгений Викторович**, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией компьютерного конструирования материалов (г. Томск);

Пермяков Петр Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны (г. Якутск).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится **9 декабря 2021 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ИМСС УрО РАН»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зув

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Искусственно замороженные грунты широко используются для создания прочных, водонепроницаемых ограждений для строительства подземных сооружений в сложных гидрогеологических условиях. Однако в ходе замораживания грунтов вследствие морозного пучения и криогенной миграции влаги изменяется их напряженно-деформированное состояние, что может привести к повреждению наземных зданий, а также к увеличению нагрузки на формируемое ледопородное ограждение (ЛПО) и крепь строящейся горной выработки. Более того, в замороженных грунтах, находящихся под нагрузкой, развиваются реологические процессы, характеризующиеся возрастанием деформации и уменьшением прочности со временем нагружения. Таким образом, достоверная оценка несущей способности искусственно замороженных грунтов требует комплексного расчета их напряженно-деформированного состояния от начала замораживания до выполнения проходческих работ.

Перспективным подходом к описанию механического поведения промерзающих и мерзлых грунтов является построение связанных математических моделей, позволяющих рассчитывать изменение полей напряжений и деформаций вместе с другими физическими полями. В связи с развитием вычислительной техники активно разрабатываются термогидромеханические модели, объединяющие в себе уравнения теории тепло- и массопереноса и механики деформируемого твердого тела, что дает возможность добиться адекватного учета криогенных процессов в замораживаемых грунтах. Вместе с современными методами контроля искусственно замораживаемого породного массива данные модели могут обеспечить адекватную оценку напряженно-деформированного состояния ограждения из замороженного грунта в зависимости от принимаемых инженерных и технических решений. Диссертационная работа посвящена построению математической модели промерзания влагонасыщенных грунтов с учетом термогидромеханических эффектов и ее применения для исследования процесса проведения вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания и анализа данных, полученных путем термометрического мониторинга и измерений в гидронаблюдательных скважинах.

Степень разработанности темы исследования. Промерзание насыщенного грунта сопровождается сложным взаимодействием между теплопереносом, массопереносом и эволюцией напряженно-деформированного состояния грунта. Систематическое исследование криогенных процессов в грунтах началось в 20 – 30-ых годах прошлого века в работах Сумгина М.И. и Taber S., посвященных преимущественно экспериментальному изучению замерзания поровой влаги в промерзающих грунтах, определению их физико-механических свойств.

Начавшееся в середине XX века бурное создание инфраструктуры на территориях с сезонно-промерзающими и многолетнемерзлыми грунтами, распространение технологии искусственного замораживания грунтов для строительства подземных сооружений способствовало проведению большого количества

исследований, направленных на комплексное изучение процессов теплопереноса, массопереноса, механического поведения промерзающих и мерзлых грунтов, построению математических соотношений для их описания. Значительный вклад в развитие экспериментальных методов и математических моделей внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как Цытович Н.А., Глобус А.М., Лыков А.В., Трупак Н.Г., Далматов Б.И., Хакимов Х.Р., Картозия Б.А., Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Иванов Н.С., Орлов В.О., Городецкий С.Э., Ершов Э.Д., Edlefsen N., Anderson A., Everett D.H., Andersland O.B., Ladanyi B., Harlan R.L., Miller R.D., Gilpin R.R., Morgenstern N.R., Konrad J.M., O'Neill K. В результате проведенных на этом этапе исследований были созданы первые связные модели, позволяющие описывать распределение влаги в процессе замерзания, предсказывать деформации и силы морозного пучения.

Дальнейшее развитие существующих и построение новых связных моделей, проведено в работах Гречищева С.Е., Кожевникова Н.Н., Кроника Я.К., Горелика Я.Б., Бровко Г.П., Пермяков П.П., Кудрявцева С.А., Вабищевича П.Н., Nixon J.F., Michalowski R.L., Bronfenbrener L., Vitel M., Huang S. Существенный прогресс в теоретическом описании криогенных процессов в промерзающих грунтах обусловлен созданием термогидромеханических моделей, которые позволяют совместно рассматривать теплоперенос, массоперенос и эволюцию распределения полей напряжения и деформации в грунте. Актуальный взгляд на построение данных моделей представлен в работах Thomas H.R., Nishimura S., Zhou J., Lai Y., Li S., Tounsi H., Rouabhi A. с соавторами. Однако на основе анализа современных работ можно заключить, что имеется большое разнообразие подходов к построению термогидромеханических моделей, что свидетельствует о недостаточной изученности этого вопроса. Высокую актуальность также имеет проблема лабораторной верификации и применимости современных численных моделей в инженерной практике для расчета взаимодействия сооружений с пучинистыми грунтами, оценки и прогноза состояния ЛПО, формируемого способом искусственного замораживания для строительства подземных сооружений.

Целью диссертационной работы является построение трехмерной математической модели промерзания влагонасыщенных грунтов с учетом термогидромеханических эффектов, позволяющей провести моделирование мероприятий, выполняемых при проходке вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих подходов и соотношений для математического описания криогенных процессов в грунтах и разработка на их основе термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, позволяющей выполнять расчет морозного пучения и усадки грунта вследствие миграции влаги к фронту промерзания, а также его неупругого деформирования и реологического течения в замороженном состоянии.

2. Разработка стратегии верификации модели на основе лабораторных экспериментов по искусственному замораживанию влагонасыщенных грунтов и механических испытаний замороженного грунта на ползучесть.

3. Демонстрация возможностей модели путем численного моделирования процесса искусственного замораживания обводненных грунтовых слоев алеврита и песка для условий Петриковского месторождения калийных солей.

4. Численное моделирование деформирования шахтной выработки, пройденной в грунтовых слоях алеврита и песка под защитой ЛПО, с учетом изменения их природного напряженно-деформированного состояния, вызванного искусственным замораживанием, для технологических условий рудника Петриковского ГОК.

5. Расчет оптимальной толщины ЛПО по критериям предельного напряженного состояния и предельно допустимой деформации путем численного моделирования деформирования ледопородного цилиндра, модификация формул Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. на основе полученных результатов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Построена и верифицирована по данным лабораторных экспериментов для супеси, глины и песка новая термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта, описывающая взаимосвязь между падением температуры, образованием порового льда, миграции влаги к фронту промерзания, морозного пучения грунта в замороженной зоне и его усадки вблизи фронта промерзания.

- Реализован подход к численному моделированию проведения вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания, включающий в себя этап идентификации параметров модели на основе стандартизованных лабораторных испытаний на пучинистость и ползучесть, и позволяющий проводить расчеты как формирования ЛПО при различной интенсивности криогенной миграции влаги, так и неупругого деформирования стенки шахтной выработки, пройденной под защитой сплошного ЛПО, с учетом реологических свойств грунта в замороженном состоянии и изменения природного напряженно-деформированного состояния грунтового слоя, произошедшего на этапе формирования ЛПО.

- Проведен анализ влияния морозного пучения и криогенной миграции влаги на формирование напряженно-деформированного состояния искусственно замораживаемого грунтового слоя, пространственное распределение льдистости по толщине ЛПО, эволюцию уровня подземных вод в незамороженном грунте, заключенном внутри ЛПО.

- Определены величины радиального перемещения стенки шахтной выработки, пройденной внутри ЛПО, с учетом анализа криогенных процессов.

- Построены новые аппроксимационные зависимости безопасной толщины ЛПО от величины бокового давления, позволяющие проводить оптимизацию режима замораживания для конкретных инженерно-геологических условий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в построении и алгоритмизации в среде Comsol Multiphysics® трехмерной термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, позволяющей оценивать напряженно-деформированное состояние грунта в процессе замерзания, описывать перераспределение влаги в грунте, вызванное криогенным всасыванием, и выполнять расчет деформации морозного пучения.

Практическая значимость работы заключается в разработке подхода к численному моделированию формирования ЛПО в обводненном грунтовом слое и процесса неупругого деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки, пройденной под защитой ЛПО. Предложенная модель может быть использована на стадии проектирования и проведения искусственного замораживания для оптимизации технологических параметров и интерпретации полевых измерений, выполненных в контрольно-термических и гидронаблюдательных скважинах. При этом для идентификации параметров модели требуются только стандартизованные лабораторные испытания грунтов по определению степени пучинистости, теплофизических, фильтрационных, деформационно-прочностных свойств, входящие в экспериментальную программу исследований перед применением искусственного замораживания.

В дополнение к этому получены уточненные аппроксимационные соотношения для определения безопасной толщины ЛПО от величины бокового давления, которые могут применяться для проведения инженерных расчетов.

Методология и методы исследования. Методологическая база диссертационной работы основана на положениях теории промерзающих и мерзлых грунтов. Для построения термогидромеханической модели используются подходы механики сплошных сред, соотношения теории пористых сред, теории теплопереноса и массопереноса, механики деформируемого твердого тела. Компьютерная реализация модели выполняется в программном комплексе Comsol Multiphysics®¹. Для численного решения уравнений модели используется метод конечных элементов. Идентификация параметров модели проводится в рамках расчетно-экспериментального подхода путем согласования результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Трехмерная термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта, позволяющая описывать процессы миграции влаги к фронту фазового перехода, морозного пучения грунта в замороженной зоне и его усадки вблизи фронта промерзания.

2. Процедура верификации модели по данным лабораторных экспериментов по искусственному замораживанию супеси, алевролитистой глины, песка, а также механических испытаний мерзлого алевролитистого песка на ползучесть.

¹COMSOL Multiphysics®: No 9600871

3. Результаты численного моделирования формирования ЛПО в грунтовых слоях способом искусственного замораживания для условий Петриковского месторождения калийных солей.

4. Результаты численного моделирования неупругого деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки, пройденной под защитой ЛПО, для условий строительства шахтных стволов рудника Петриковского ГОК.

5. Уточненные на основе результатов численного моделирования формулы Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. для расчета безопасной толщины ЛПО в зависимости от бокового давления по критериям предельного состояния и максимального допустимого перемещения.

Достоверность построенной модели обеспечивается согласованием используемых предположений и гипотез экспериментальным наблюдениям, непротиворечивостью основных гипотез модели существующим теоретическим представлениям о физике исследуемых процессов. Достоверность результатов численного моделирования достигается путем соблюдения методологии проведения вычислительного эксперимента и подтверждается удовлетворительным соответствием численных результатов как с экспериментальными данными лабораторных испытаний, проведенных в «ИМСС УрО РАН», Институте природопользования НАН Беларуси и других исследовательских центрах, так и полевых измерений, выполненных в ходе контроля состояния ЛПО при строительстве шахтного ствола на руднике Петриковского ГОК.

Личный вклад автора заключается в анализе современного состояния исследований по теме работы, участии в проведении экспериментов по замораживанию грунтов и построении термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта, компьютерной реализации модели, выполнении численного моделирования изучаемых процессов и сопоставлении результатов расчета с данными лабораторных экспериментов и полевых измерений.

Апробация работы. Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 12 международных и российских научных конференциях: European Conference on Fracture (Belgrade, 2018), «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, 2019, 2021), Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019), International Conference – Fracture and Structural Integrity (Catania, 2019), International Conference on Structural Integrity (Funchal, 2019), Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов "Актуальные проблемы недропользования" (онлайн формат, 2020, 2021), Международный форум конкурс студентов и молодых ученых "Актуальные проблемы недропользования" (онлайн формат, 2020; очно, 2021), Virtual European Conference on Fracture (онлайн формат, 2020), Virtual Congress WCCM & ECCOMAS 2020 (онлайн формат, 2021)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, проиндексированных в международных системах цитирования и входящих в список журналов, рекомендованных ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы (192 наименования). Диссертация содержит 60 рисунков и 19 таблиц. Объем диссертации составляет 211 страниц.

Во **введении** обоснованы актуальность и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, проанализирована теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложено краткое содержание глав работы.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и состоит из трех параграфов. В параграфе 1.1 приводятся основные законы и уравнения теории теплопереноса и массопереноса, используемые для расчета изменения температуры и миграции влаги в промерзающих грунтах, рассматриваются опубликованные ранее результаты лабораторных исследований явления морозного пучения, обсуждаются классические теории недеформируемого льда и сегрегационного потенциала. В параграфе 1.2 приводятся определяющие соотношения механики мерзлых грунтов для описания их упруго-пластического деформирования и развития в них реологических процессов при длительном нагружении. В параграфе 1.3 представлен обзор современных термогидромеханических моделей промерзания влагонасыщенных грунтов, в рамках которого рассматриваются их ключевые особенности и примеры применения для выполнения инженерных расчетов.

Вторая глава посвящена построению оригинальной термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта. В параграфах 2.1–2.3 приводится математическая формулировка модели. Предполагается, что промерзающий грунт представляет собой трехфазную пористую среду, состоящую из твердых частиц (индекс s), жидкой воды (индекс l) и кристаллов льда (индекс i). Процесс промерзания описывается системой уравнений массопереноса, теплопереноса и равновесия, которые записываются следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho_j S_j n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i S_i n)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_l \mathbf{v}_l) = 0, \quad (1)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + C_l \mathbf{v}_l \cdot \operatorname{grad} T = L \rho_i \frac{\partial n S_i}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\gamma} = 0, \quad (3)$$

где $\rho_j S_j n$ – массовое содержание воды ($j = l$) и льда ($j = i$) в момент времени t ; ρ_j – плотность и S_j – насыщенность фазы j ; n – пористость; \mathbf{v}_l – скорость воды относительно твердого скелета; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор полного напряжения; $\boldsymbol{\gamma}$ – удельный вес пористой среды; T – температура; C – объемная теплоемкость и λ – теплопроводность пористой среды; C_l – объемная теплоемкость воды; L – удельная теплота кристаллизации воды.

Фазовый переход поровой воды в лед задается в модели в предположении термодинамического равновесия с помощью степенной зависимостью льдонасыщенности S_i от температуры T . Скорость воды v_l описывается законом Дарси. Поровое давления воды p_l определяется в зависимости от температуры T и эффективного порового давления p с использованием уравнением Клаузиуса-Клапейрона как²

$$p_l = \frac{(1-\chi)(\rho_l - \rho_i)p_0 + (1-\chi)\rho_i\rho_l L \ln(T/T_{ph}) + \rho_l p}{\chi\rho_l + (1-\chi)\rho_i}, \quad (4)$$

где p_0 – начальное давление воды; T_{ph} – температура замерзания поровой влаги; χ – параметр порового давления. Давление p вычисляется с применением соотношения поромеханики в зависимости от пористости n и упругой объемной деформации ε_{vol}^{el} как

$$p = N(n - n_0 - b\varepsilon_{vol}^{el} + 3\alpha_T(b - n_0)(T - T_0)), \quad (5)$$

где T_0 , n_0 – начальная температура и пористость; b , N – эффективный коэффициент и модуль Био; α_T – коэффициент температурного расширения.

В уравнении равновесия полное напряжение σ определяется как

$$\sigma = \sigma' - bp\mathbf{I}, \quad (6)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор, σ' – тензор эффективного напряжения, который связан с упругой деформацией ε^{el} законом Гука для изотропной среды.

В процессе промерзания грунт в замороженной зоне может претерпевать значительное объемное расширение под воздействием сил морозного пучения, характеризующихся поровым давлением p . Использование в этом случае определяющих соотношений пороупругости может привести к чрезвычайно завышенной оценке среднего эффективного напряжения. Для более реалистичного описания напряженно-деформированного состояния в модель добавляется неупругая объемная деформация ε_{vol}^{fh} , которая вычисляется согласно ассоциированному закону пластического течения с поверхностью текучести F такой, что

$$F = \sigma'_m - \sigma_{ten}, \quad (7)$$

где σ'_m – среднее эффективное напряжение, $\sigma_{ten} \approx c \operatorname{ctg} \varphi$, c – коэффициент сцепления, φ – угол внутреннего трения.

Во время проходческих работ ЛПО в течение длительного времени находится под воздействием давления подземных вод и окружающей массы незамерзшего грунта, поэтому в модель добавляются определяющие соотношения для расчета ползучести грунта в замороженном состоянии. Ползучесть заморо-

²Lai Y., Pei W., Zhang M., Zhou, J. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol.78. – P.805-819.

женного грунта описывается вязкоупругой деформацией, которая определяется как³

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{ve} = \left(\frac{\sigma'_{eq}}{\xi} \tau^\omega \right)^{\frac{1}{m}} \frac{\mathbf{s}'}{\sigma'_{eq}}, \quad (8)$$

где ξ , m , ω – материальные параметры, σ'_{eq} – интенсивность эффективного напряжения, \mathbf{s}' – девиатор напряжения $\boldsymbol{\sigma}'$, τ – безразмерный параметр времени.

Параграф 2.3 посвящен компьютерной реализации модели в конечно-элементом пакете Comsol Multiphysics®. Особенность предложенного подхода заключается в том, что численное решение массопереноса (1) в данном пакете выполняется относительно пористости n . При этом численное решение уравнений теплопереноса (2) и равновесия (3) проводится стандартным образом относительно температуры T и перемещения \mathbf{u} .

В третьей главе представлены результаты верификации модели на основе лабораторных экспериментов по искусственному замораживанию влагонасыщенных грунтов и одноосных механических испытаний мерзлого грунта на ползучесть.

В параграфе 3.1 проведен анализ возможности разработанной модели описывать формируемое в промерзающем грунте под влиянием криогенного всасывания распределение воды и льда на основе результатов эксперимента Mizoguchi M., полученных при одностороннем замораживании образцов супеси, упакованных в цилиндры с жесткими стенками, в отсутствие притока воды. Установлено, что модель позволяет описать эволюцию пористости промерзающего грунта, характеризующуюся увеличением пористости в замороженной зоне грунта вследствие морозного пучения и падением пористости вблизи фронта промерзания, вызванным миграцией влаги под влиянием криогенного всасывания. Максимальное отклонение рассчитанной величины пористости от экспериментально измеренной не превышает 10%.

В параграфе 3.2 исследуется применимость разработанной модели к расчету морозного пучения путем численного моделирования эксперимента Lai Y. и др. по одностороннему замораживанию образцов алевролитистой глины, упакованных в цилиндры с жесткими стенками, при наличии подтока влаги. Экспериментальные данные рассматривались для двух температурных режимов замораживания с отрицательными температурами -1.6°C и -4.0°C на верхнем торце, и положительными температурами 1.0°C и 1.5°C на нижнем торце. В ходе замораживания к верхним торцам образцов прикладывалась вертикальная нагрузка 50 и 100 кПа.

Результаты расчета показали, что модель, позволяет описывать как эволюцию температуры внутри образца, так и увеличение абсолютной деформации

³Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность грунтов – М: Издательство АН СССР, 1959. – 190 с.

морозного пучения грунта с течением времени до момента стабилизации температуры. При промерзании образца грунта с массивным льдообразованием без формирования толстых ледяных шпиров, наблюдаемое во втором режиме замораживания, результаты численного моделирования более точно предсказывают величину абсолютной деформации морозного пучения, чем в случае промерзания грунта с образованием толстых ледяных шпиров, как происходило при первом режиме замораживания. Для второго режима замораживания отклонение между рассчитанной и измеренной величинами вертикального перемещения верхнего торца образца не превышает 3%, тогда как для первого режима оно составило 10%.

В параграфе 3.3 на основе численного моделирования эксперимента по радиальному замораживанию кварцевого песка, упакованного в цилиндрический пластмассовый контейнер с жесткими стенками, исследуется возможность модели описывать промерзание грунта вокруг замораживающей колонки, используемой для формирования ЛПО. Эксперимент проводился в лаборатории Термомеханики твердых тел «ИМСС УрО РАН» с использованием волоконно-оптического датчика деформации (Рис. 1).

Результаты численного моделирования показали, что модель позволяет предсказать изменение температуры со временем в грунте и характер его деформирования. Из рис. 2 видно, что рассчитанная зависимость изменения деформации со временем достаточно точно описывает экспериментальные данные. При этом наблюдается увеличение количественного расхождения между рассчитанной и экспериментальной величинами деформации в начале замораживания и при локальном переходе грунта из состояния сжатия в состояние растяжения.

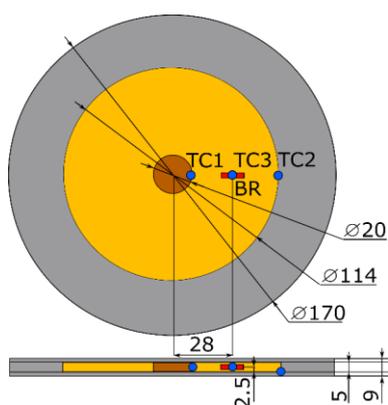


Рисунок 1 – Схема контейнера с грунтом (все размеры указаны в мм; TC1, TC2, TC3 – термопары, BR – датчик деформации)

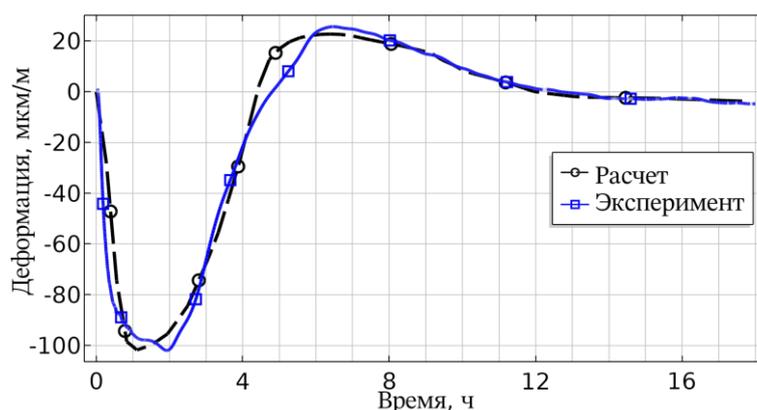


Рисунок 2 – Изменение относительной радиальной деформации со временем, полученное в результате расчета и измеренное деформационным датчиком BR

В параграфе 3.4 выполнена верификация соотношения (8) для вязкоупругой деформации, включенного в модель для описания ползучести грунтов в замороженном состоянии. На основе численного моделирования одноосных механических испытаний мерзлого алевритистого песка показано, что на стадиях

неустановившейся и установившейся ползучести рассчитанное изменение осевой деформации со временем хорошо согласуется с измерениями с отклонением не более 11% в диапазоне нагружения от 1.13 МПа до 4.53 МПа.

Четвертая глава посвящена применению разработанной термогидромеханической модели к расчету формирования ЛПО для строительства вертикального шахтного ствола на руднике Петриковского ГОК.

В параграфе 4.1 рассматривается трехмерное численное моделирование искусственного замораживания слоев алевролита и песка в диапазоне глубин 50-58 м и 65-85 м с учетом криогенных течений, морозного пучения и усадки. Постановка задачи приведена в подпараграфе 4.1.1. Пренебрегая отклонением оси замораживающих скважин от вертикального направления, численное моделирование проводилось для области, ограниченной двумя плоскостями симметрии, проекции которых на горизонтальное сечение грунтового слоя показаны на рис. 3а красными прямыми. Первая плоскость проходит через центр одной из замораживающих скважин, а вторая плоскость проходит посередине между выбранной скважиной и соседней к ней, она называется замковой. На рис. 3б представлена схема граничных условий, согласно которой на границе замораживающей скважины заданы температура замораживания T_{well} и пористость n_b , равная $1.09n_0$, где n_0 – начальная пористость. Перемещение на границе скважины разрешено только в вертикальном направлении. На внешней границе области поддерживаются естественные температура T_0 и пористость n_0 . На верхнюю границу области действует давление вышележащих пород P_{ob} .

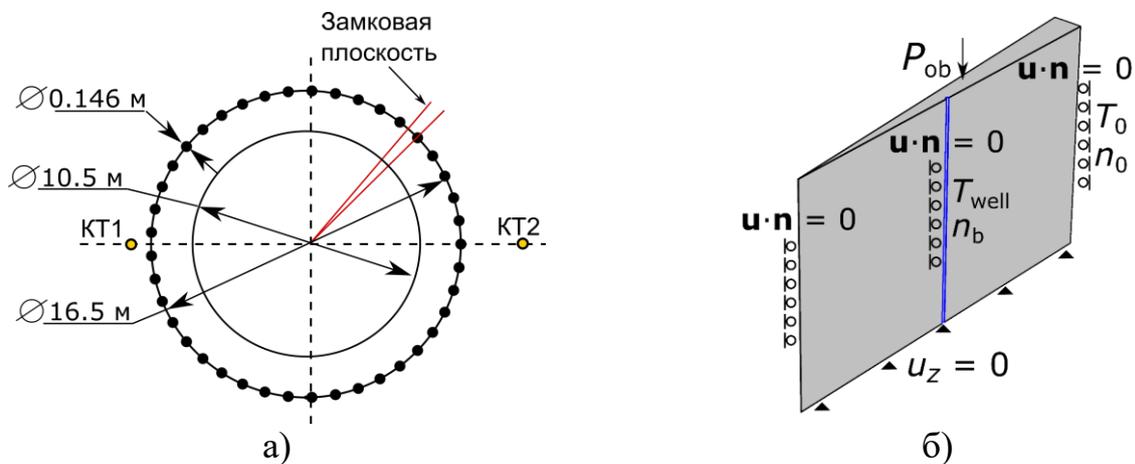


Рисунок 3 – Схема расположения замораживающих и контрольно-термических (КТ1 и КТ2) скважин в горизонтальном сечении слоя грунта (красными прямыми обозначена рассматриваемая область) (а), схема граничных условий (б)

В подпараграфах 4.1.2, 4.1.3 представлены результаты идентификации параметров модели по данным лабораторных испытаний на пучинистость, предоставленных Институтом природопользования НАН Беларуси, и анализ точной сходимости.

В подпараграфе 4.1.4 представлены результаты численного моделирования искусственного замораживания грунтовых слоев. На рис. 4 представлены

графики изменения температуры со временем, измеренные в наблюдательных скважинах КТ1 и КТ2 во время проведения активной стадии искусственного замораживания на Петриковском месторождении и полученные в результате численного моделирования. Видно, что рассчитанные графики температуры хорошо согласуются с полевыми измерениями.

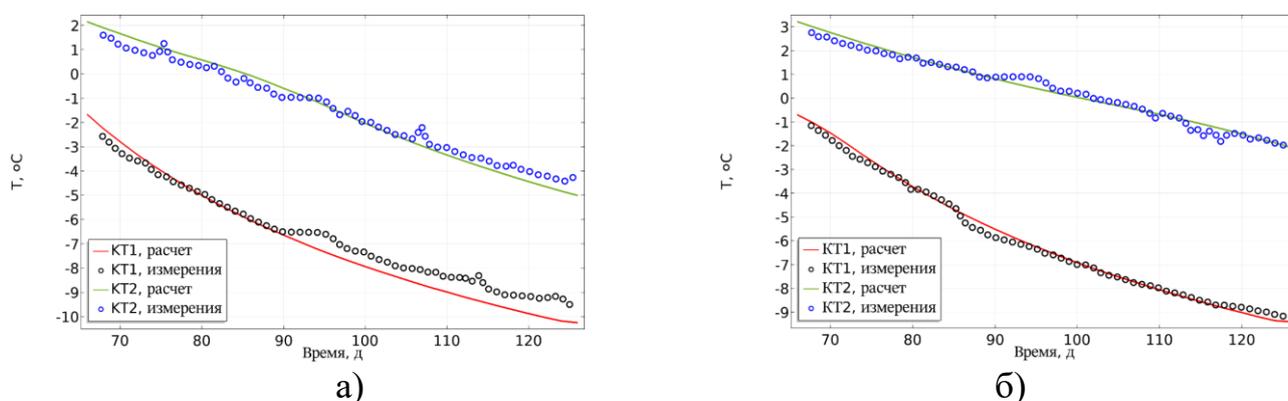


Рисунок 4 – Изменения температуры T со временем в слое песка (а) и алевролита (б), измеренные в наблюдательных скважинах КТ1 и КТ2 и полученные в точках их расположения в результате численного моделирования

Искусственное замораживание грунтовых слоев приводит к возникновению морозного пучения. В слое песка морозное пучение происходит только за счет объемного расширения при замерзании воды, изначально содержащейся в порах. В этом грунтовом слое распределение пористости по толщине ЛПО однородное, а увеличение пористости в замороженной зоне составляет 9% (рис. 5). Объемное расширение грунта в замороженной зоне вызывает сжатие незамороженного грунта внутри ЛПО, что приводит к росту порового давления при увеличении толщины сплошного ЛПО (рис. 6).

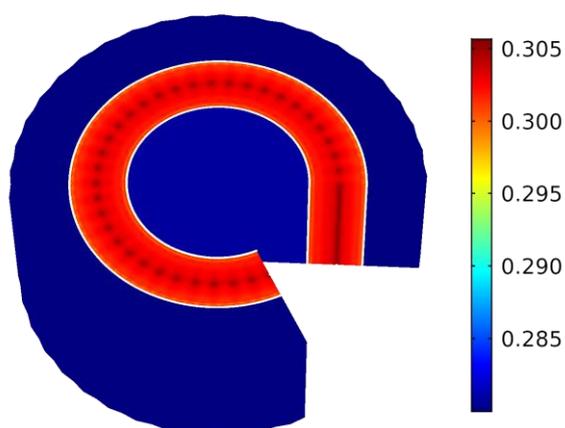


Рисунок 5 – Распределение пористости n в слое песка после 52 дней замораживания

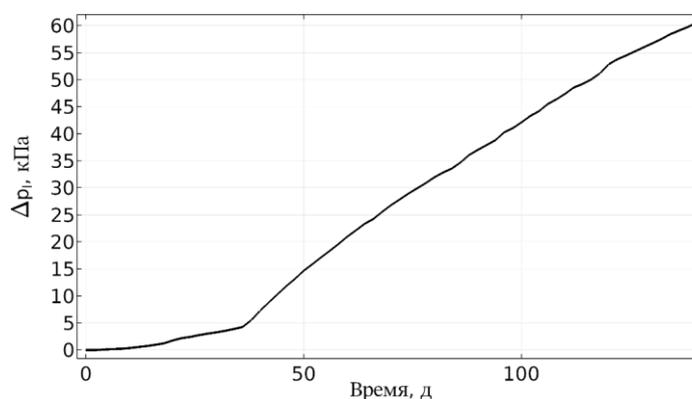


Рисунок 6 – Изменение порового давления воды со временем в песке внутри контура замораживающих скважин

Вследствие возникновения миграции влаги к фронту промерзания в слое алевролита формируется неоднородное по радиусу и углу распределение пори-

стости по толщине ЛПО, а морозное пучение развивается более интенсивно (рис. 7а). Наибольшая величина пористости наблюдается вблизи границы замораживающей скважины и достигает 21%. Вместе с тем, перераспределение влаги, происходящее до смыкания ЛПО, приводит к образованию области с пониженной пористостью вблизи замковой плоскости.

Интенсивное морозное пучение алеврита приводит к значительному объемному расширению грунта в большей части замороженной зоны и его переходу из состояния сжатия в состояние растяжения (рис. 7б). При этом область с пониженной пористостью остается в состоянии сжатия, а обезвоженный грунт вблизи границ ЛПО консолидируется (рис. 8).

В отличие от слоя песка повышение порового давления в незамороженном алеврите, заключенном внутри ЛПО, происходит с увеличением толщины ЛПО более выражено, однако ввиду отсутствия внешних источников воды по истечении 110 суток поровое давление начинает снижаться по мере оттока воды к внутренней границе ЛПО под влиянием криогенного всасывания (рис. 9).

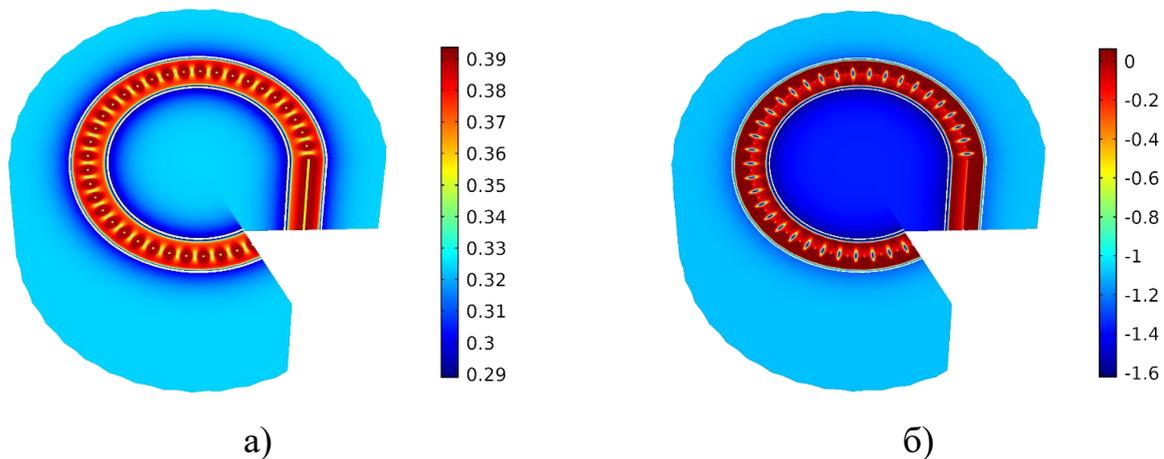


Рисунок 7 – Распределение пористости n (а) и среднего эффективного напряжения σ'_m [МПа] в слое алеврита после 70 дней замораживания

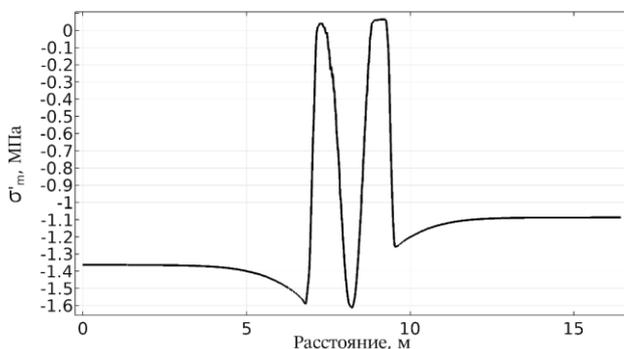


Рисунок 8 – Профиль среднего эффективного напряжения σ'_m вдоль отрезка, лежащего в замковой плоскости

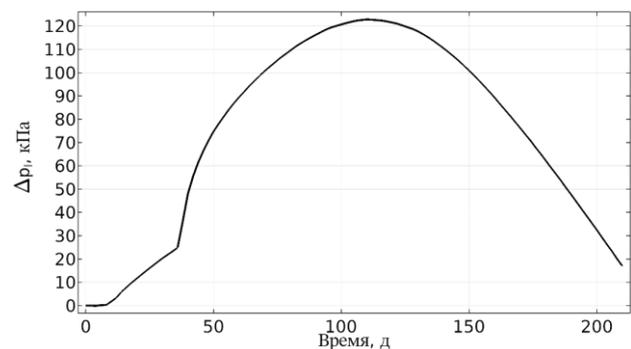


Рисунок 9 – Изменение порового давления воды со временем в алеврите внутри контура замораживающих скважин

В подпараграфе 4.1.5 полученные результаты были использованы для анализа влияния криогенного всасывания и морозного пучения на распределе-

ния напряжения в искусственно замороженных слоях алеврита и песка. Для проведения анализа была выполнена дополнительная серия расчетов искусственного замораживания грунтовых слоев в предположении отсутствия этих явлений. Показано, что в незамороженном грунте, примыкающем к внешней границе ЛПО, происходит повышения абсолютной величины среднего эффективного напряжения как за счет механического воздействия со стороны замороженной зоны, так и дополнительного сжатия грунта, вызванного оттоком воды под влиянием криогенного всасывания. В слое алеврита неучет криогенных процессов приводит к занижению оценки среднего эффективного напряжения на внешней границе ЛПО на 49%, а в слое песка на 16%.

В параграфе 4.2 выполняется анализ натуральных измерений уровня подземных вод внутри ЛПО, проведенных в гидронаблюдательных скважинах при искусственном замораживании на Петриковском месторождении. Разработанная модель позволила описать наблюдаемое увеличение порового давления, вызванное ростом толщины сплошного ЛПО (рис. 10). Путем вариации технологических параметров замораживания и физико-механических свойств грунта, установлено, что величина порового давления в незамороженном грунте внутри ЛПО в значительной степени определяется воздействием на него замороженного грунта за счет морозного пучения, а также зависит от интенсивности криогенных течений.

В главе пять представлены результаты исследования процесса деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки, пройденной под защитой ЛПО.

Параграф 5.1 посвящен численному моделированию деформирования искусственно замороженных слоев алеврита и песка с шахтной выработкой с учетом и без учета изменения их природного напряженно-деформированного состояния, вызванного криогенными процессами.

В подпараграфе 5.1.1 описывается геометрия расчетной области и схема граничных условий. Геометрия и размеры области были такими же, как для численного моделирования искусственного замораживания грунтовых слоев, но с исключением из нее объема, соответствующего извлеченному грунту в результате проходческих работ (рис. 11).

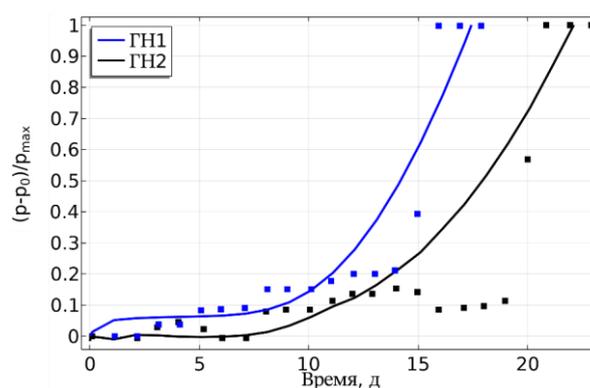


Рисунок 10 – Изменение нормированной величины порового давления со временем в гидронаблюдательных скважинах, полученное в результате измерений (точки) и путем численного моделирования (кривые)

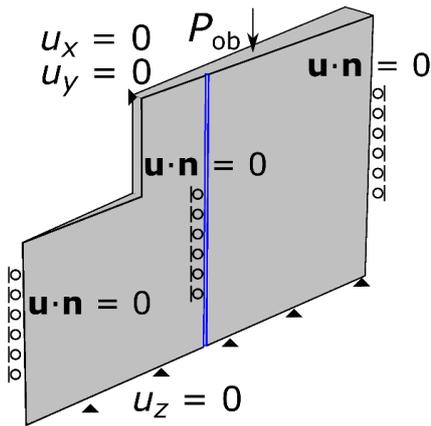


Рисунок 11 – Расчетная схема грунтового слоя с выработкой

Сверху выработка закреплена по горизонтальным перемещениям, что задает влияние вышележащей крепи. Остальные граничные условия соответствовали условиям, наложенным при численном моделировании искусственного замораживания грунтовых слоев. Расчеты в каждом грунтовом слое проводились для проектной толщины ЛПО и при промерзании грунта до сечения шахтного ствола.

В подпараграфе 5.1.2 представлены результаты идентификации параметров в соотношении (8) для вычисления деформации ползучести по данным механических испытаний замороженных грунтов на ползучесть, выполненных в Институте

природопользования НАН Беларуси.

В подпараграфе 5.1.3 проведен анализ результатов численного моделирования деформирования замороженных слоев алеврита и песка с выработкой. Установлено, что в независимости от толщины ЛПО и начальных условий под воздействием нагрузки происходит выпучивание боковой стенки выработки и поднятие ее дна (рис. 12). Максимум абсолютной величины радиального перемещения грунта достигается на стенке выработки. Из анализа деформирования грунтовых слоев следует, что пренебрежение изменением напряженного состояния, вызванного формированием ЛПО, в слое алеврита приводит к занижению оценки перемещения стенки выработки на 32% при проектной толщине ЛПО и 47% в случае промерзания грунта до шахтного ствола, а в слое песка на 13% и 27%.

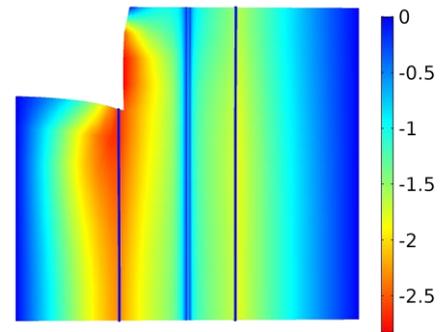


Рисунок 12 – Распределение радиального перемещения в слое алеврита

В параграфе 5.2 проведен теоретический анализ формул Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. для расчета толщины ЛПО по максимальному допустимому перемещению и предельному напряженному состоянию на основе результатов численного моделирования деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки внутри ЛПО. Рассматривались три породных слоя песок, глина и мел, наиболее часто встречающиеся в осадочном чехле Петриковского месторождения. Боковое давление на внешнюю стенку ЛПО рассчитывалось для глубин от 100 до 500 м. Численного моделирования проводилось в соответствии с новой схемой расчета, которая в отличие от постановки Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. учитывала механическое поведение грунта ниже дна заходки.

Результаты моделирования, представленные в подпараграфах 5.2.1 и 5.2.2, позволили заключить, что в зависимости от типа горной породы и величины действующего давления формулы могут предсказывать как заниженную,

так и завышенную оценку толщину ЛПО по сравнению с оценкой, определенной путем моделирования. На основе проведенного анализа предложены модификации формул. Для расчета толщины E по максимально допустимому перемещению Δ модифицированная формула записывается как

$$E = \frac{1}{2} a \left[\left(1 + g(P_{lat}) \frac{(1-m)P_{lat}h^{1+m}}{A_{cr}\Delta^m a} \right)^{\frac{1}{1-m}} - 1 \right], \quad (9)$$

где a – внутренний радиус ЛПО; h – высота заходки; P_{lat} – величина бокового давления; A_{cr} , m – реологические параметры замороженного грунта; g – квадратичная аппроксимационная функция, параметры которой подбираются, исходя из результатов численного моделирования. При расчете толщины E по предельно напряженному состоянию модифицированная формула имеет вид

$$E = a \left\{ \left[1 + \frac{P_{lat}(\Lambda - 1)}{\bar{\Lambda}} \right]^{\frac{1}{\Lambda-1}} - 1 \right\} + \zeta, \quad (10)$$

где коэффициенты Λ , $\bar{\Lambda}$ зависят от прочностных свойств грунта в замороженном состоянии; ζ – параметр, определяемый по результатам численного моделирования.

Данные формулы были использованы специалистами Горного института УрО РАН в инженерных расчетах для составления проекта искусственного замораживания для проходки стволов на Дарасинском руднике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построена математическая модель, позволяющая описывать криогенные процессы при искусственном замораживании влагонасыщенных грунтов. Верификация модели выполнена по данным оригинальных и ранее опубликованных лабораторных экспериментов.

С использованием построенной модели была решена серия задач, описывающих комплекс инженерных мероприятий по проходке вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания для условий Петриковского месторождения калийных солей. Представленный в работе подход к решению данных задач может послужить основой для создания новой методики обоснования инженерно-технических решений для проходки шахтных стволов способом искусственного замораживания, включающей в себя этап идентификации входных параметров по стандартизованным лабораторным испытаниям керна материала, расчет формирования ЛПО и оценки его состояния на основе интерпретации данных систем мониторинга, определения напряженно-деформированного состояния стенки шахтной выработки на этапе ведения проходческих работ под защитой сформированного ЛПО.

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Построена термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта, учитывающая взаимосвязь между явлениями падения температуры, образования порового льда, миграции влаги к фронту промерзания, морозного пучения грунта в замороженной зоне и его усадки вблизи фронта промерзания.

2. Адекватность модели показана путем сопоставления результатов численного моделирования промерзания влагонасыщенного грунта и деформирования замороженного грунта с данными лабораторных экспериментов по искусственному замораживанию супеси, алевролитистой глины и песка, а также одноосных механических испытаний на ползучесть замороженного алевролитистого песка.

3. На примере численного моделирования искусственного замораживания грунтов на Петриковском месторождении показаны следующие особенности формирования ЛПО.

- При промерзании грунта без криогенной миграции влаги формируется однородное распределение пористости по толщине ЛПО, увеличение пористости в замороженной зоне составляет 9%. Объемное расширение в замороженной зоне приводит к сжатию незамороженного грунта, заключенного внутри ЛПО, результатом чего является монотонный рост порового давления с увеличением толщины ЛПО.

- Криогенная миграция влаги приводит к интенсивного морозному пучению и формированию неравномерного распределения пористости по толщине ЛПО. Интенсивное морозное пучение способствует росту пористости более чем на 9% и переходу грунта из состояния сжатия в состояние растяжения в большей части замороженной зоны. В результате обезвоживания грунта образуется область с пониженной пористостью вблизи замковой плоскости и происходит дополнительное сжатие грунта вблизи границ ЛПО. Поровое давление в замороженном грунте внутри ЛПО быстро растет после смыкания ледопородных цилиндров, однако криогенное всасывание в конечном итоге приводит к падению порового давления.

- Уровень подземных вод в гидронаблюдательных скважинах внутри ЛПО существенно зависит от воздействия сил морозного пучения на незамороженный грунт и интенсивности криогенных течений.

- Возникающие в грунтовых слоях при формировании ЛПО морозное пучение и криогенная миграция влаги приводят к изменению их природного-напряженно-деформированного состояния и увеличению радиального перемещения стенки шахтной выработки, пройденной внутри ЛПО.

4. Показано, что формулы Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. для расчета оптимальной толщины ЛПО по критериям предельного напряженного состояния и максимальным допустимым перемещениям могут предсказывать как заниженную, так и завышенную оценку толщины ЛПО по сравнению с оценкой, определенной на основе результатов численного моделирования напряженно-

деформированного состояния стенки шахтной выработки, проведенного с использованием новой расчетной схемы, учитывающей механическое поведение грунта ниже дна заходки. По результатам моделирования предложены модифицированные формулы для технологических условий проходки на руднике Петриковского ГОК.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. **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.(ВАК, Scopus)

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.(WoS)

3. **Zhelnin 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.(WoS)

4. Semin M.A., Levin L.Y., **Zhelnin 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.(WoS)

5. Semin M.A., Zaitsev A.V., Parshakov O.S., **Zhelnin 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.(WoS)

6. **Zhelnin 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.(Scopus)

7. **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.(WoS)

8. **Zhelnin 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(Scopus)

9. **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.(ВАК, Scopus)

10. **Желнин М.С.**, Плехов О.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива

ва в процессе искусственного замораживания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 56 – 75.(BAK, Scopus)

11. Zhelnin 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. (Scopus)

12. Prokhorov A., Kostina A., **Zhelnin 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.(WoS)

13. **Zhelnin 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.(WoS)

14. Kostina A., **Zhelnin M.**, Plekhov O., Pantelev I., Levin L. Numerical simulation of freezing pipe deformation during artificial ground freezing // Procedia Structural Integrity. – 2019. – V.18. – P.293-300.(WoS)

15. **Zhelnin M.**, Kostina A., Plekhov O., Pantelev I., Levin L. Numerical simulation of soil stability during artificial freezing // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol.17. – P.316-323.(WOS)

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

17. Pantelev I., Kostina A., **Zhelnin 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.(WOS)

18. Pantelev I., Kostina A., **Zhelnin 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: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. Edited by V. Litvinenko MAY 22-26, 2018. CRC Press. 2018. pp. 1273-1278(WOS)