

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Желнина Михаила Сергеевича** на тему «**Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика деформируемого твердого тела

Сложные гидрогеологические условия при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, таких как шахты и горные выработки, диктуют необходимость создания и поддержки водонепроницаемых ограждений, обеспечивающих безопасность эксплуатации. Одним из наиболее распространенных решений в таких случаях является применение метода искусственного замораживания грунта. При этом возникает ряд специфических явлений, таких как морозное пучение и криогенная миграция влаги, которые влияют на напряженно-деформированное состояние как самого ледопородного ограждения, так и на крепь горной выработки и наземные строения.

Поэтому задачи построения и поиска способов решений связанных математических моделей, учитывающих изменение напряженно-деформированного состояния в зависимости от динамики температурных полей и фазового состава среды, в силу их сложности и разнообразия, остаются весьма *актуальными*.

В своей работе Желниним М.С. рассмотрены различные подходы к моделированию промерзания влагонасыщенного грунта с учетом связанных процессов тепло-массообмена и эволюции напряженно-деформированного состояния, включая теплофизические подходы, используемые в Институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН для моделирования поведения поровой влаги в промерзающих грунтах оснований транспортной, производственной и жилой инфраструктуры районов резко-континентального климата Центральной Якутии и Арктики. Диссертантом справедливо отмечается, что существует большое разнообразие подходов к построению термогидромеханических моделей, а также имеются проблемы лабораторной верификации и применимости их в инженерной практике, в частности, для расчета взаимодействия сооружений с пучинистыми грунтами, оценки и прогноза состояния искусственных ледопородных сооружений. Это проблема возникает и в связи с необходимостью сохранения многолетней мерзлоты при строительстве в криолитозоне.

В диссертационной работе представлена *методология* численного моделирования на основе теории промерзающих и мёрзлых грунтов, компьютерная реализация производится в среде Comsol Multiphysics® методом конечного элемента. Идентификация параметров модели выполняется путем согласования результатов численного моделирования с экспериментальными данными. *Достоверность и обоснованность* полученных автором результатов подтверждаются корректностью построения и согласованием используемых предположений и гипотез экспериментальным наблюдениям,

непротиворечивостью основных гипотез модели существующим теоретическим представлениям о физике исследуемых процессов, подтверждается соответствием численных результатов с экспериментальными данными лабораторных испытаний, проведенных в «ИМСС УрО РАН», Институте природопользования НАН Беларуси и других исследовательских центрах, а также полевым измерениям, выполненным при строительстве шахтного ствола на руднике Петриковского ГОК.

Следует отметить существенную *научную новизну* выполненного исследования. Так, по данным лабораторных экспериментов для супеси, глины и песка построена и верифицирована новая термогидромеханическая модель промерзания влаг насыщенного 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, выполнен анализ влияния морозного пучения и криогенной миграции влаги на формирование напряженно-деформированного состояния искусственно замораживаемого грунтового слоя, определены величины радиального перемещения стенки шахтной выработки с учетом анализа криогенных процессов.

Более того, в данной работе можно выделить ряд *практически значимых* положений, в частности, результаты моделирования неупругого деформирования неподкрепленной стенки шахтной выработки под защитой льдопородного ограждения, для условий строительства шахтных стволов рудника Петриковского ГОК, а также уточненные на основе результатов моделирования формулы Зарецкого Ю.К. и Вялова С.С. для расчета безопасной толщины ограждения в зависимости от бокового давления по критериям предельного состояния и максимально допустимого перемещения.

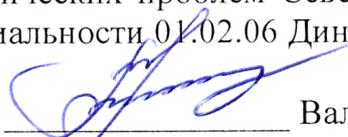
В качестве замечаний следует отметить следующие вопросы:

- 1) Применение конечноэлементного пакета Comsol Multiphysics® для реализации разработанной модели сняло ряд сложностей, возникающих при численном решении связанных задач, в частности, поиска оптимальных значений пространственной и временной сетки для устойчивости решения, с одной стороны, и достаточной точности получаемых решений, с другой. Насколько хорошо эта проблема решается в данном комплексе?
- 2) В автореферате также не отражён вопрос, связанный с предыдущим, он касается точности (ассигуры) полученных решений, - насколько она зависит от параметров связности, пространственной сложности, граничных и начальных условий? Проводился ли такой анализ в достаточно широком диапазоне параметров модели? В частности, применима ли модель в условиях значительных температурных перепадов, очень низких температур, для моделирования протаивания влагонасыщенных пористых грунтов?
- 3) В работе имеются незначительные грамматические ошибки.

Отмеченные замечания, однако, не снижают ценность выполненной Желниным М.С. работы в целом.

Диссертация «Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании», судя по автореферату, посвящена решению актуальной вычислительной и практической задачи, направленной на обеспечение устойчивости массива искусственно замороженных пород для безопасной эксплуатации шахтной выработки, и представляет собой законченную работу, отвечающую требованиям ВАК РФ, изложенным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий», результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, а ее автор, Желнин Михаил Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика деформируемого твердого тела.

Директор Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,  
доктор технических наук по специальности 01.02.06 Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры

  
« 24 » ноября 2021 г.

Валерий Валерьевич Лепов

Подпись Лепова В.В. заверяю,  
Ученый секретарь ИФТПС СО РАН,  
канд. физ.-мат. наук



Надежда Анатольевна Протодьяконова



Институт Физико-Технических Проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»

Адрес: 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.

Телефоны: (4112) 39-06-00, (4112) 33-66-65

Факс: (4112) 33-66-65, (4112) 33-66-08

e-mail: administration@iptpn.ysn.ru

