

В диссертационный совет Д004.036.01
на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Пермский федеральный исследовательский
центр Уральского отделения Российской
академии наук

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию Желнина Максима Сергеевича
«Моделирование гидромеханического поведения грунтов
при искусственном замораживании»,
представленную к защите на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Механика мерзлых и промерзающих грунтов является важным направлением механики деформируемого твердого тела, активно развиваемым на протяжении всего XX века. В последние два десятилетия его актуальность стремительно возросла вследствие выраженных климатических изменений, особенно в Арктических широтах, и широкого применения передовых дорогостоящих методов строительства подземной инфраструктуры в сложных гидрогеологических условиях (водонасыщенные слабосвязанные грунты и низкопрочные высокопористые горные породы). Для прогнозирования изменений напряженно-деформированного состояния, пористости, проницаемости и влагонасыщенности грунтов в процессе их промерзания в последние десятилетия активно развиваются математические модели, реализуемые в рамках континуальных численных методов. Несмотря на широкий спектр моделей, используемых в настоящее время для описания различных аспектов термомеханического поведения водонасыщенных грунтов в процессе промерзания и миграции поровой влаги, большинство таких моделей имеет весьма ограниченные возможности применения. Эти ограничения связаны либо с несвязанной / частично связанной формулировкой модели (теплофизическая, гидромеханическая, термомеханическая), либо с их одномерной постановкой (для полностью связанных моделей на основе поромеханики). Количество связанных термогидромеханических моделей, применимых для изучения различных аспектов поведения промерзающих грунтов как многофазных «hard matter – soft matter» систем в трехмерной постановке, исчисляется единицами. При этом отдельной важной проблемой, требующей индивидуального решения в каждом конкретном случае, является реализация этих нелинейных связанных моделей в рамках континуальных численных методов. В целом можно отметить, что ввиду крайне сложности изучаемого многофазного объекта и нелинейности его поведения, до сих пор не разработан общий подход к построению и трехмерной численной реализации связанного математического формализма промерзающих влагонасыщенных грунтов на макромасштабном уровне. Отсутствие такого подхода и его эффективной численной реализации, в частности, сдерживает применение компьютерного моделирования и анализа для построения цифровых двойников областей грунтовых пластов, окружающих различные подземные инфраструктурные объекты, включая шахтные поля.

Диссертация М.С. Желнина направлена на заполнение этого пробела. Она

посвящена построению трехмерной полностью связанной математической модели термогидромеханического поведения флюидонасыщенных грунтов с учетом возможности перехода поровой жидкости в твердофазное состояние, а также разработке эффективного способа ее численной реализации в рамках стандартизированного и широко применяемого программного комплекса. Развитая модель применяется для качественного и количественного анализа вкладов ключевых механических аспектов явления промерзания (пучения и криогенных течений) в изменение напряженного состояния, пористости и влагонасыщенности как замороженных областей грунта, так и прилегающих областей. Более того, на примере конкретного шахтного поля развитая модель успешно используется для повышения предсказательной способности оценочных соотношений для безопасной и экономически оптимальной толщины кольцевых ледопородных ограждений вертикальных выработок.

Сказанное выше обуславливает высокую актуальность, научную и практическую значимость данной диссертационной работы.

Структурно диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит достаточное для понимания количество формул и информативных иллюстраций. Список использованной литературы включает 192 источника, исчерпывающе охватывающих рассматриваемую проблематику. Объем диссертации составляет 211 страниц машинописного текста.

Во Введении приводится общая информация о проблематике исследования, ее актуальности и степени проработанности. Обосновывается актуальность, теоретическая и практическая значимость работы. Формулируются цель и задачи диссертационной работы, положения на защиту, дана информация о 18 публикациях по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых реферативными базами данных научных публикаций Web of Science и Scopus, приводится обширный перечень научных мероприятий, на которых апробированы результаты исследования.

В первой главе дается обширный и очень детальный обзор литературы по теме диссертации, охватывающий историю вопроса на горизонте более семидесяти лет. Обзорная глава состоит из нескольких разделов, рассматривающих классические и современные модели тепло и массопереноса во влагонасыщенных грунтах и низкопрочных пористых породах, модели для описания упругого и неупругого поведения замороженных пород на различных временных масштабах (пластичность и ползучесть), а также разнообразные связанные термогидромеханические модели, учитывающие эффекты фазового перехода порового флюида, криогенную миграцию флюида, формирование ледяных шпиров и т.д. Делаются выводы о преимуществах и ограничениях рассмотренных моделей. Акцентируется внимание на том, что наиболее полные и адекватные связанные модели в настоящее время реализованы только в одномерной постановке, что чрезмерно сужает область их потенциального практического применения.

Вторая глава посвящена построению оригинальной связанной термогидромеханической модели промерзающих влагонасыщенных грунтов в рамках рассмотрения грунта как трехфазной пористой среды. Данная модель является трехмерным обобщением нескольких ранее развитых одномерных связанных моделей и учитывает процессы кондуктивного и конвективного теплопереноса, массопереноса порового флюида, механическое и гидрологическое влияние фазового перехода «вода-лед» (морозное пучение и криогенные течения), особенности неупругого деформирования твердофазного каркаса породы на различных временных масштабах. Видимыми ограничениями развитой модели являются неучет возможности формирования ледяных

шлиров и/или макротрещин. Эти приближения вполне адекватны на макромасштабном уровне, но ограничивают применимость модели для описания явлений на мезомасштабе. В то же время развитая модель является открытой и предполагает учет этих эффектов в будущем для качественного расширения области и условий ее применения.

В третьей главе проводится верификация и валидация развитой модели на основе сопоставления результатов моделирования с доступными результатами лабораторных экспериментальных исследований процессов замораживания различных грунтов и ползучести замороженных грунтов. Необходимо отметить, что использованные эксперименты фактически предполагают одномерную постановку задач, что не дает возможности в полной мере оценить корректность развитой трехмерной модели. Тем не менее, проведенные в последующих главах исследования дают достаточные основания убедиться в адекватности модели и ее применимости для изучения процессов промерзания грунтов и анализа напряженно-деформированного состояния трехмерных областей пластов влагонасыщенных грунтов.

Четвертая глава посвящена численному изучению искусственного замораживания областей водонасыщенных грунтов цилиндрической геометрии на примере условий Петриковского месторождения калийных солей. Для пластов различного состава (алевриты, пески) выявлены особенности кинетики процесса замораживания, напряженно-деформированного состояния, пористости и влагонасыщенности как самого ЛПО, так и прилегающих внутри и снаружи областей грунта. Показано, в частности, важное влияние криогенной миграции влаги на скорость формирования ЛПО и величину изменения пористости в промерзшей породе, а также консолидацию грунта в прилегающих областях. Показаны особенности изменения порового давления внутри ЛПО и кольцевой области, ограниченной ЛПО, в различных грунтах, вызванные морозным пучением и миграцией поровой жидкости к зоне промерзания. Обсуждается и обосновывается важность применения связанного анализа уровня подземных вод и термометрии для выработки достоверного заключения о достижении сплошности цилиндрического ЛПО.

В пятой главе проведен анализ влияния ЛПО на напряженное состояние и величину радиальных смещений стенок создаваемой вертикальной цилиндрической выработки. Показано влияние толщины ЛПО на величину радиальных смещений стенок выработки для различных грунтов. Обоснована важность применения численного моделирования с использованием моделей, учитывающих морозное пучение грунта и криогенную миграцию порового флюида, для корректной оценки величины выпучивания стенок выработки и поднятия ее дна. Проведен анализ применимости классических формул Зарецкого-Вялова, оценивающих необходимую (безопасную) толщину ЛПО с точки зрения допустимых величин радиального смещения стенок выработки и предельного напряженного состояния прилегающего слоя грунта. Предложены и обоснованы более корректная постановка задачи и новые эмпирические соотношения, позволяющие получать оптимальные значения толщины ЛПО по обоим критериям в интервале глубин, как минимум, до 500 м. Данный результат видится крайне важным для оптимизации затрат на создание ЛПО и значимого снижения себестоимости разработки шахтных полей.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования, выносимые на защиту.

Все основные результаты, защищаемые положения и выводы работы являются новыми. Сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомендации получены с использованием численной реализации развитой диссертантом связанной термогидромеханической модели, на основе корректной и обоснованной

постановки задач численного моделирования. Это стало возможным, благодаря чёткому пониманию и трактовке диссертантом анализируемых физических явлений. Полученные результаты, включая развитую модель и новые соотношения для оценки оптимальных толщин ЛПО, применимы к широкому классу низкопрочных (высокопористых) осадочных пород и грунтов, насыщенных поровым флюидом, в широком интервале глубин.

Научную новизну диссертационной работы М.С. Желнина составляют результаты, выносимые на защиту:

1. Впервые разработана и реализована в рамках метода конечных элементов оригинальная связанная трехмерная термогидромеханическая модель промерзающих влагонасыщенных грунтов и высокопористых осадочных пород, учитывающая механическое влияние фазовых переходов «вода-лед» (в том числе вызванные этим эффекты криогенного «всасывания») и неупругое поведение породы на различных временных масштабах. Важно отметить, что развитый формализм является «открытым», то есть, предполагает дальнейшее развитие на основе применения более общих моделей неупругого поведения породы, явного и неявного учета эффектов формирования ледяных шпиров и т.д.

2. Показано важное, а в ряде случаев ключевое влияние криогенной миграции влаги к зоне промерзания на напряженно-деформированное состояние, величину пористости и влагонасыщенность примыкающих областей незамерзшего пласта. Даны количественные оценки такого влияния для нескольких распространенных видов осадочных пород (алевриты, пески).

3. На основе систематического численного изучения напряженно-деформированного состояния участка выработки проведена модернизация классических, широко используемых при проектировании ЛПО в водонасыщенных слабосвязанных породах формул Зарецкого-Вялова для оценки оптимальной толщины таких ограждений. Полученные соотношения расширяют область применения классических формул на интервал глубин, как минимум, до 500 м и на более широкий спектр низкопрочных осадочных пород.

Достоверность основных положений диссертации достигается за счет использования строгих математических подходов и методов, а также сравнения результатов численного моделирования с имеющимися аналитическими оценками, результатами лабораторных экспериментальных исследований (проводимых в ИМСС УрО РАН и Институте природопользования НАН Беларуси и доступных в литературе), данными измерений и мониторинга на разрабатываемых месторождениях и результатами компьютерного моделирования, проведенного другими авторами.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новой обобщенной (трехмерной связанной) термогидромеханической модели влагонасыщенных грунтов, учитывающей ключевые механические и теплофизические аспекты фазового превращения порового флюида.

Практическая значимость. Развитая в работе модель может эффективно применяться для компьютерного изучения влияния динамики перераспределения порового флюида и его замерзания на напряженно-деформированное состояние слабосвязанных горных пород (грунтов и высокопористых осадочных пород), величину пористости и проницаемости, макроскопические реологические свойства. Таким образом, развитый математический формализм и его предложенная численная реализация могут стать основой для создания трехмерных цифровых двойников шахтных полей в

осадочных флюидонасыщенных породах. Предпосылки создания таких двойников убедительно показаны на примере численного изучения процессов формирования ледопородного ограждения на Петриковском месторождении калийных солей и его влияния на напряженно-деформированное состояние окрестностей шахтной выработки на различных глубинах. Несомненную практическую значимость имеют и обобщенные результаты численного анализа, а именно уточненные формулы для определения безопасной толщины ледопородного ограждения, оптимальной с точки зрения энергозатрат на формирование такого ограждения. Последнее особенно важно для повышения эффективности крайне дорогостоящих мероприятий по разработке шахтных полей с применением ЛПО.

Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в российских и международных рецензируемых журналах, входящих в базы данных Scopus или Web of Science и рекомендуемых ВАК для диссертационных работ по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела. Личный вклад автора в представленных статьях по теме диссертации, на взгляд оппонента, является определяющим. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации, основные идеи и выводы работы. Работа прошла апробацию на большом количестве международных и всероссийских научных конференций, различных научных семинарах.

Замечания к диссертационной работе:

1. В работе проведен обширный и очень детальный анализ разнообразных моделей, применяемых для изучения различных аспектов поведения влагонасыщенных грунтов, включая замораживание/оттаивание, неупругое деформирование на различных временных масштабах, вызванное, в том числе пучением и криогенным всасыванием, и т.д. В то же время при формулировании оригинальной модели диссертант выбрал некоторые весьма спорные упрощения, в том числе такие, которые критиковал в литературном обзоре. Среди них:

- пренебрежение содержанием примесей в поровой воде, в то время как минерализация подземных вод в слоях-коллекторах может быть достаточно высокой и вызывать значимое изменение температуры кристаллизации воды и общее изменение кинетики образования льда (и его объемной доли) в зоне промерзания;

- отсутствие учета формирования ледяных шпиров, о важной роли которых диссертант говорил в обзорной главе и далее демонстрировал в экспериментах в разделе 3.2.

2. 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. Более логичным видится построение единой модели пластичности с единым критерием (тем более, что два рассмотренных критерия имеют одинаковый вид) и изменяющимися в зависимости от промерзания значениями коэффициентов критерия. Такая формулировка позволила бы одновременно рассматривать неупругое поведение как замороженных, так и не замороженных областей пласта. В настоящей постановке не замороженный грунт рассматривается как пороупругий, что на фоне учета макроскопической пластичности замороженных грунтов требует отдельного обоснования.

3. Для замороженного грунта применяется модель ползучести, не учитывающая объемные изменения, что требует отдельного обоснования, поскольку микроскопические механизмы, которые реализуют ползучесть, являются теми же самыми, что и механизмы,

реализующие пластичность (макроскопически неупругую деформацию при увеличении приложенной нагрузки). Возможно, в режимах ползучести и пластичности различны вклады от микромеханизмов, определяющих шаровую и девиаторную части неупругой деформации?

4. Требуется дополнительное обоснование выбора ассоциированных моделей пластичности и ползучести замороженных грунтов (возможно, корректность применения ассоциированных законов связана с особенностями неупругого поведения рассматриваемых материалов).

5. Очевидным достижением диссертанта является обобщение развитых другими авторами связанных моделей замерзающих грунтов (как правило, одномерных) и построение трехмерной связанной термогидромеханической модели влагонасыщенных грунтов с учетом фазового перехода поровой влаги. Однако представленные задачи, для решения которых применена новая модель, фактически являются одномерными. Также одномерными (по сути) являются и тестовые расчеты, результаты которых сравниваются с лабораторными экспериментами или данными мониторинга в контрольных скважинах или выработках. В то же время в диссертации хотелось бы увидеть результаты использования модели в трехмерных по сути задачах.

6. В ряде расчетов при моделировании объектов цилиндрической формы осесимметричная задача заменяется задачей на прямоугольных образцах (по-видимому, речь идет о прямоугольных параллелепипедах). В то же время в других расчетах решается осесимметричная задача. Если использование прямоугольников (другими словами, плоской постановки) не является опiskой диссертанта в тексте, то чем объясняется такое различие в подходах к решению различных задач, предполагающих осевую симметрию.

7. Было бы желательным более подробное внимание уделить в тексте диссертации сходимости численных результатов, поскольку речь идет об оригинальной и достаточно сложной связанной модели. В связи с этим можно отметить, что при обсуждении рисунка 4.5 (анализ сеточной сходимости) диссертант утверждает, что имеет место выход на насыщение при масштабировании размеров элементов. Однако из рисунка это совсем не очевидно.

8. В задачах о замораживании (раздел 4) не учитывается возможность вертикальной гидрологической связанности пластов и, соответственно, вызванных влиянием растущего ЛПО вертикальных течений. Возможно, это объясняет имеющиеся нестыковки данных мониторинга уровня подземных вод и температурных профилей лучше, чем вариации многочисленных параметров модели в разделе 4.2. По крайней мере, для оппонента приведенные вариации так ничего и не прояснили.

9. 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.

Указанные замечания в целом носят характер уточнений и пожеланий не влияют на общую положительную оценку данной работы, выполненной на мировом научном уровне.

Заключение. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и является завершённым научным исследованием, соответствует паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела» и имеет важное научное и практическое значение. Все результаты получены с использованием строгих математических методов и их достоверность не вызывает сомнений. Результаты работы

вносят важный вклад в развитие актуального направления механики деформируемого твердого тела – механики влагонасыщенных промерзающих грунтов – и открывают новые возможности для ее эффективного применения к решению актуальных задач прогнозирования напряженно-деформированного состояния и поведения грунтов и высокопористых осадочных пород в условиях переменных механических и термических воздействий, оценки их эффективных термомеханических свойств, проектирования и оптимизации защитных мероприятий при проходке пластов водонасыщенных грунтов и осадочных горных пород. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность темы исследования, ее цели и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Все сказанное выше позволяет сделать заключение о том, что диссертация «Моделирование гидромеханического поведения грунтов при искусственном замораживании» соответствует требованиям п. 9 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Желнин Максим Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
компьютерного конструирования материалов
ИФПМ СО РАН

Шилько Евгений Викторович

22 ноября 2021 г.

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук
Тел: +7 3822 28 69 71
E-mail: shilko@ispms.tsc.ru

Я, Шилько Евгений Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую обработку.

Подпись Е.В. Шилько заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
к.ф.-м.н.



Матольгина Н.Ю.