

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу
Аммосова Дмитрия Андреевича

«Многомасштабное моделирование многофизических задач с упругими деформациями»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В диссертационной работе Аммосова Дмитрия Андреевича разрабатываются и численно исследуются вычислительные многомасштабные алгоритмы для решения многофизических задач с упругими деформациями в неоднородных средах.

Численное решение многофизических задач с упругими деформациями в неоднородных средах имеет приложения во многих областях науки и техники. Однако методы прямого решения таких задач осложнены необходимостью учета различных неоднородностей среды (включая геометрические неоднородности) и наличия нескольких полей решения. Все это требует значительных вычислительных ресурсов. В связи с этим возникает необходимость в разработке эффективных вычислительных алгоритмов, позволяющих добиться сокращения вычислительных затрат с сохранением высокой точности решения. В диссертационной работе разрабатываются вычислительные многомасштабные алгоритмы для решения многофизических задач с упругими деформациями на грубых сетках, тем самым снижая вычислительные траты. Для этого строятся специальные многомасштабные базисные функции. Таким образом, диссертационная работа Аммосова Дмитрия Андреевича является актуальной.

Диссертация объемом 140 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Список литературы включает 157 наименований, среди которых 11 работ – работы автора по теме диссертации.

Во введении дано обоснование целей и задач исследования, приведено краткое описание многофизических задач с упругими деформациями и многомасштабных методов, обоснована актуальность проблемы и представлено содержание диссертации по главам. Также сформулированы основные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке вычислительных многомасштабных алгоритмов для решения задачи термоупругости с фазовым переходом. Аппроксимация на мелкой сетке основана на методе конечных элементов и конечно-разностном методе с неявной схемой и линеаризацией из прошлого временного слоя. На грубой сетке разрабатываются офлайн и онлайн многомасштабные алгоритмы. В первом многомасштабные пространства строятся без учета изменения свойств грунта, а во втором происходит обновление информации о среде в процессе решения задачи.

Численные результаты показывают эффективность обоих алгоритмов, но онлайн алгоритм дает меньшие погрешности.

Во второй главе диссертации рассматривается модель термopopoупругости в трещиновато-пористых средах. В данной главе строится многомасштабный алгоритм, в которой для каждого поля решения вычисляются многомасштабные базисные функции. Численные результаты представлены для неоднородных и неоднородных трещиновато-пористых сред. Сравнение с эталонным решением демонстрирует способность предложенного вычислительного алгоритма обеспечивать высокую точность при меньшей вычислительной стоимости.

Третья глава моделирует пьезоэлектрический эффект в неоднородных материалах. Рассматриваются связанный и расщепленный подходы построения многомасштабных базисных функций. Наибольший интерес представляет связанный подход, который строит базисные функции путем решения связанных локальных задач, позволяя учитывать взаимодействие перемещения и электрического потенциала. Численные результаты представлены для композитной и неоднородной сред. Оба многомасштабных подхода показали высокую эффективность. При этом связанный подход позволяет добиться более высокой точности решения ввиду учета взаимовлияния искомых полей.

В четвертой главе моделируется упругая среда Коссера. Как и в предыдущей главе, рассматриваются расщепленный и связанный подходы. Численные результаты представлены для трех видов неоднородной среды: перфорированной, композитной и стохастически неоднородной. Вычислительные многомасштабные алгоритмы демонстрируют высокую точность при меньшей размерности дискретной задачи. В то же время связанный подход позволяет добиться меньших погрешностей.

В заключении изложены основные результаты работы. **В приложении** представлено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Научная новизна полученных результатов. Автором диссертационной работы получены следующие новые результаты:

- Разработаны алгоритмы офлайн и онлайн обобщенного многомасштабного метода конечных элементов для решения задачи термоупругости с фазовым переходом в неоднородной среде.
- Разработан алгоритм обобщенного многомасштабного метода конечных элементов для задачи термopopoупругости в неоднородных и неоднородных трещиновато-пористых средах.
- Разработан алгоритм обобщенного многомасштабного метода конечных элементов с использованием связанных и расщепленных базисных функций для задачи пьезоэлектричества в композитной и стохастически неоднородной средах.
- Разработан алгоритм обобщенного многомасштабного метода конечных элементов с использованием связанных и расщепленных базисных

функций для задачи упругости Коссера в перфорированной, композитной и стохастически неоднородной средах.

Достоверность и степень обоснованности. Полученные результаты были представлены на различных международных и российских конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК, Web of Science и Scopus. Кроме того, имеется свидетельство о регистрации программного обеспечения.

По диссертационной работе можно сформулировать следующие замечания:

1. В разделе 1.1 вводится функция содержания воды $w(T)$, которая используется для «сглаживания» границы фазового перехода в численном моделировании. Эта функция содержит эмпирическую константу α , величина которой определяет толщину переходной зоны фазового перехода. Введение функции содержания и константы α направлено на упрощение численного моделирования и не связано с физикой исследуемого явления. В этой связи представляет интерес оценка влияния α на результаты расчетов, и оценка сходимости результатов при уменьшении α . Такая оценка в диссертационной работе не приводится, однако она была бы полезна для подтверждения точности результатов численного моделирования.

2. При исследовании морозного пучения грунта диссертант пренебрегает фильтрацией воды. Это предположение представляется избыточно сильным, так как при изменении порового объема, вызванного образованием льда, и сопутствующим повышением порового давления можно ожидать интенсивную фильтрацию. Течение воды может приводить к значительному перераспределению порового давления и, следовательно, влиянию на рассчитываемые поля.

3. В главе 2 исследуются нестационарные процессы в трещиновато-пористой среде, причем для удобной реализации численной схемы и применения метода ОММКЭ скорость фильтрации берется с явного слоя по времени. В частности, из-за такой реализации численного алгоритма возникает вопрос о влиянии шага по времени на рассчитываемые поля как в случае эталонного решения, так и в случае многомасштабного моделирования. В работе не приводится оценка влияния шага по времени на численное решение. Она была бы полезна для подтверждения точности расчета.

4. В разделе 4.4.1 при рассмотрении тестовой задачи, предполагается, что внутреннее вращение на левой границе области отсутствует (уравнения (4.44)). Если средой Коссера моделируется сыпучая пористая среда, то не ясно как можно реализовать такое граничное условие в реальном физическом эксперименте. Сформулированная постановка задачи выглядит слишком абстрактной.

5. Вся работа посвящена рассмотрению пористых сред с достаточно абстрактными распределениями коэффициента теплопроводности, проницаемости, упругих констант и других параметров пористой среды.

Причем эти поля гладкие и медленно меняющиеся. Для практики было бы интереснее рассмотреть процессы в слоистых пористых средах, соответствующих осадочным горным породам. Будет ли разработанный метод хорошо работать в таких средах, где параметры пористой среды резко изменяются на границах слоев? Ответ на этот вопрос усилил бы диссертационную работу.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Представленная диссертационная работа соответствует основным требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Аммосов Дмитрий Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
Лаборатории общей гидромеханики
НИИ механики МГУ,
член-корреспондент РАН, профессор РАН,
доктор физико-математических наук

Афанасьев А.А./

“03” июля 2023 г.

Контактная информация:

Научно-исследовательский институт механики, ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова», лаборатория общей гидродинамики.

Адрес: 119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1.

Телефон: +7-(495)-939-57-67

Адрес электронной почты: afanasyev@imec.msu.ru

Подпись Афанасьева А.А. заверяю:

