

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Савенкова Евгения Борисовича

«Математическое моделирование развития флюидонаполненных трещин в пороупругой среде» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

В представленной на отзыв диссертационной работе Е.Б. Савенкова поставлена и решается задача о разработке математической модели, вычислительных алгоритмов и комплекса программ для моделирования развития заполненной жидкостью трещины в пороупругой среде в связанной постановке.

Диссертация выполнена на актуальную тему, которая обусловлена прикладной и теоретической важностью задачи. Новизна работы заключается в том, что автор рассматривает ее в трехмерной постановке, с учетом всех основных механизмов, сопровождающих развитие трещины (включая течение в трещине, эволюцию полей напряжений и давлений в среде, непосредственно развитие трещины) и при минимальных естественных допущениях на геометрию трещины. Работа охватывает, в комплексе, круг вопросов, связанных как с разработкой математической модели процесса, так и вычислительных алгоритмов и их программной реализации. Предложенные до настоящего времени подходы, в основном, основаны на применении отдельных, слабо связанных между собой алгоритмов для решения частных задач - либо упрощенных постановок - и не дают эффективного решения рассмотренной в диссертации проблемы.

Работа включает в себя введение, шесть глав, заключение и приложение.

Во введении представлена общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследований, представлен краткий обзор основных современных результатов по тематике работы, формулируются цели и задачи диссертации, выносимые на защиту положения, перечисляются публикации по тематике работы.

Первая глава работы посвящена описанию математических моделей течения в трещине, эволюции полей давления и напряжений во вмещающей трещину пороупругой среде, геометрической эволюции трещины и определяющим ее критериям разрушения. Далее рассматривается полная, связанная модель развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде, включающая в себя, помимо частных моделей отдельных процессов, нужным образом сформулированные условия согласования на срединной поверхности трещины и критерии развития трещины.

Во второй главе представлен обзор вычислительных алгоритмов, которые, с одной стороны, могут быть применены для решения частных задач (соответствующих отдельным подмоделям полной модели), а с другой - могут быть применены в рамках алгоритма решения связанной задачи. В результате, на основе представленного в главе анализа, формулируется конкретная схема вычислительного алгоритма для решения полной связанной задачи, ставятся конкретные задачи, которые рассматриваются в последующих главах работы.

В третьей главе рассмотрены вопросы представления срединной поверхности трещины в модели и вычислительных алгоритмах. Срединная поверхность трещины рассматривается как произвольная, но достаточно гладкая поверхность с краем. Для ее представления используется метод проекции ближайшей точки. Описываются основные понятия этого метода. Формулируются предложенные автором алгоритмы расчета эволюции

поверхности в априори заданном поле скорости. Предложенный способ представления поверхности далее единообразно используется в последующих главах работы.

Четвертая глава работы посвящена описанию предложенного в работе алгоритма для решения задач теории упругости и пороупругости при наличии трещины. Предложенный алгоритм является вариантом метода X-FEM с использованием метода проекции ближайшей точки для представления трещины. Приводится описание алгоритма, рассматриваются вопросы итерационного связывания групп уравнений упругости и фильтрации. В заключении главы приводятся примеры численных расчетов.

Пятая глава посвящена методам решения уравнений на стационарных и эволюционирующих поверхностях с краем, вложенных в трехмерное пространство. Рассматриваются как модельные постановки задач, с помощью которых иллюстрируются основные компоненты предложенных алгоритмов, так и содержательная постановка для уравнения смазочного слоя, определенного на эволюционирующей поверхности с краем. Предложенные алгоритмы основаны на продолжении исходного уравнения в пространство и дальнейшем применении метода конечных элементов. В заключение главы приводятся результаты ряда тестовых и демонстрационных расчетов.

В шестой главе рассмотрены алгоритмы решения связанной задачи о развитии флюидонаполненной трещины в пороупругой среде. Приводится критический обзор ранее известных алгоритмов, анализируются их особенности и применимость для решения рассматриваемой задачи. Далее предлагается новый алгоритм решения задачи, который использует ранее предложенные алгоритмы решения частных задач. Приводятся результаты численных расчетов, демонстрирующих возможности предложенных алгоритмов.

В приложении приводятся результаты дополнительных тестовых расчетов.

Автором диссертационной работы получены следующие новые результаты:

1. Трехмерная математическая модель развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде, включающая в себя группы уравнений пороупругости, течения в трещине и развития срединной поверхности трещины. Построенная модель является согласованной, неизотермической, описывает трещину с произвольной гладкой срединной поверхностью. Развитие трещины определяется критерием с использованием векторного J -интеграла Черепанова-Райса.
2. Вычислительные алгоритмы для описания эволюции срединной поверхности трещины с использованием метода проекции ближайшей точки, интегрирования по поверхности, вычисления локальных базисов в окрестности трещины. Представленная методика не требует непосредственной аппроксимации поверхности.
3. Вычислительный алгоритм «расширенного» метода конечных элементов - X-FEM/CP, использующий метод проекции ближайшей точки для представления поверхности и описания ее эволюции.
4. Вариационные (слабые) постановки начально-краевых задач для решения уравнения смазочного слоя на стационарных и эволюционирующих поверхностях с применением метода проекции ближайшей точки. Предлагаемые постановки основаны на продолжении уравнения на поверхности в трехмерное пространство и вариационном способе учета главных граничных условий на границе трещины.
5. Метод решения уравнений смазочного слоя на стационарных и эволюционирующих поверхностях с краем. Предложенный метод использует эйлерово описание течения в

области с изменяющейся геометрией, основан на конечно-элементном варианте метода проекции ближайшей точки с использованием построенных вариационных постановок.

6. Вычислительный алгоритм решения полной связанной задачи развития флюидонаполненной трещины в рамках предложенной трехмерной самосогласованной модели. Алгоритм является эйлеровым, использует единое представление поверхности для решения пороупругой задачи во вмещающей трещину среде и течения в трещине. Алгоритм использует единую эйлерову расчетную сетку, не привязанной к срединной поверхности трещины.
7. Комплекс программ для моделирования развития флюидонаполненных трещин, реализующий предложенные новые модели и алгоритмы. Продемонстрирована эффективность кода при решении задач с учетом практически важных особенностей и эффектов, сопровождающих развития трещин гидроразрыва.

Основные результаты работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, неоднократно докладывались на научных конференциях, как российских, так и международных.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена использованием в работе строгого математического аппарата, современных обоснованных представлений механики сплошной среды. Работоспособность предложенных алгоритмов подтверждена значительным количеством тестовых расчетов.

Научно-практическая значимость результатов исследования связана с важностью рассматриваемых автором постановок задач, как с точки зрения приложений, так и с точки зрения развития современных методов вычислительной математики. Практическое применение результатов исследований связано прежде всего с задачами теоретической и нефтегазовой геофизики. С алгоритмической точки зрения предложенные автором методы и подходы решения задачи об анализе развития динамики флюидонаполненной трещины в пороупругой среде значительно расширяют и обобщают существующие алгоритмы и позволяют анализировать процесс развития трещины в более реалистичных, по сравнению с распространенными, постановках. По результатам диссертации получено два свидетельства о регистрации программ.

Необходимо отметить, что работа предлагает целостный однородный базис (модели, численные алгоритмы, их реализация) для моделирования процессов в флюидосодержащих трещиноватых средах. Этот базис может служить основой для развития иерархических серий моделей как рассматриваемых процессов, так и других, связанных с ними.

Другим несомненным достоинством работы является фундаментальность исследования моделей и алгоритмов с применением современных методов математической физики и численных методов, продуманная система тестирования.

Положительное впечатление оставляет подробность и аккуратность описания алгоритмов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

К тексту диссертации есть ряд замечаний.

1. Отдельный интерес представляют собой условия согласования на фронте флюида (п.1.6). Предложенные подходы представляются удачными, тем более хотелось бы видеть подробное исследование соответствующих численных расчетов. Это замечание следует рассматривать, скорее, как пожелание.

2. В предложенной автором математической модели явно предполагается, что раскрытие трещины может являться переменным по ее срединной поверхности, но тем не менее строго положительно во всех ее точках, за исключением фронта трещины. Это накладывает определенные ограничения на характер нагрузок, действующих в среде, они в работе в явном виде не сформулированы. В частности, возникает вопрос об описании течения в трещине и постановке задачи, когда допускается смыкание боковых поверхностей трещины внутри нее (по существу, это приводит к локальному нарушению сплошности среды). Замечание также является, скорее, пожеланием.

3. В работе представлено большое количество результатов расчетов. Некоторые из них достаточно скудно описаны. Например, представленные в п.6.5.2 последовательные распределения полей на рис. 6.11 и 6.12 отличаются крайне незначительно, тогда как их описание (стр.217) состоит из двух коротких предложений, одно из которых говорит, что можно заметить существенное влияние развития трещины на поля давления.

4. В тексте работы присутствует ряд опечаток, см., например, подписи к рисункам 6.33 и 6.34 и некоторые другие.

Указанные замечания не оказывают влияния на общую очень высокую оценку работы. Автором решена крупная научная-практическая проблема, связанная с анализом развития флюидонаполненных трещин в пороупругой среде средствами математического моделирования. Работа является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Содержание диссертации и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции 1 октября 2018 года) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Савенков Е.Б., безусловно заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,

профессор

факультета Вычислительной математики и кибернетики

МГУ имени М.В. Ломоносова,

д.ф.-м.н.

12.11.2020



С.И. Мухин

119991 ГСП-1, г. Москва,

Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2-й учебный корпус, факультет ВМК, Кафедра вычислительных методов

Телефон: +7 (916) 114-51-19, +7 (495) 939-21-95

Эл. почта: vmmus@cs.msu.ru

Подпись С.И. Мухина удостоверяю.



Подпись удостоверяю
Ведущий специалист по кадрам

Т.Г. Коваленко