

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации
проектирования Российской
академии наук

123056, Москва, ул. 2-я Брестская, д.19/18
Телефон: (499)250-02-62
Факс: (499)250-89-28
E-Mail: icad@icad.org.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАП РАН,
д.ф.-м.н.

Никитин И.С.

« 20 » ноября 2020 г.

от 20.11.2020 № 2171-057
на № _____ от _____ г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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»

Актуальность темы диссертации

Теория трещин является одной из классических и до настоящего времени активно развиваемых областей механики деформируемого твердого тела. Важность анализа условий и характера развития трещин связана прежде всего с тем, что подавляющее большинство сред и материалов, как естественного, так и техногенного происхождения, являются трещиноватыми. Аналитические методы описания динамики трещин применимы лишь в ограниченном числе ситуаций. Поэтому одними из основных методов исследования подобных задач являются методы математического моделирования. Развитие трещин является сложным процессом, который имеет нелокальный характер и определяется целым комплексом физических механизмов. Разработка математических моделей эволюции трещин и соответствующих вычислительных алгоритмов является важной научно-технической проблемой. Примером такой актуальной проблемы является моделирование развития флюидонаполненных трещин, эволюция которых происходит, в том числе, за счет изменения полей давления при течении флюидов в объеме трещин. Эта проблема имеет важное прикладное значение в силу того, что создание техногенных трещин является основой технологии гидравлического разрыва пласта для увеличения нефтеотдачи.

Разработка методов математического моделирования для описания процессов указанного класса является важной научно-практической задачей. Существующие на данный момент решения этой проблемы не вполне удовлетворительны и нуждаются в дальнейшем развитии. Решению

данной проблемы посвящена представленная на отзыв диссертационная работа Е.Б.Савенкова. В работе рассматривается полный круг вопросов, связанный с математическим моделированием динамики развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде, включая разработку математической модели и комплекса вычислительных алгоритмов для ее анализа. Моделирование проводится в трехмерной постановке с учетом всех наиболее важных процессов, обуславливающих процесс развития трещины. Разработанные в работе новые численные модели и алгоритмы позволяют анализировать процесс развития трещины гидроразрыва с минимальными допущениями о характере ее геометрии и в условиях, близких к реалистичным.

Краткий анализ содержания работы

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и приложения.

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

В последующих главах работы рассматриваются, последовательно, предлагаемая автором математическая модель процесса развития флюидонаполненной трещины (глава 1), обзор вычислительных алгоритмов для решения полной и частных задач (глава 2). вычислительные алгоритмы для решения трехмерных уравнений пороупругости во вмещающей трещину среде (глава 3), расчета геометрической эволюции срединной поверхности трещины как гладкой поверхности с краем (глава 4), решения двумерных уравнений течения в трещине (глава 5), и, наконец, решения полной связанной задачи (глава 6).

Особенностью разработанной математической модели и работы в целом являются минимальные естественные допущения о распределении свойств среды (среда может быть неоднородной с точки зрения упругих, фильтрационно-емкостных и прочностных свойств) и характере эволюции срединной поверхности трещины, которая описывается как произвольная достаточно гладкая поверхность с краем. Базовым вычислительным алгоритмом, который использует автор, является метод конечных элементов. Для представления срединной поверхности трещины как при решении уравнений в среде, так и на поверхности, единообразно используется так называемый метод проекции ближайшей точки. Это позволяет автору сформулировать чисто эйлеровый алгоритм расчёта полной связанной задачи. При этом для решения как трехмерной задачи пороупругости, так и двумерной задачи течения в смазочном слое (объеме трещины) используется единая фиксированная расчетная сетка; дополнительные расчетные сетки для решения задачи на поверхности трещины не вводятся. Для решения задач пороупругости при наличии трещин автором предложен оригинальный вариант метода X-FEM/CP, в котором при решении уравнений на поверхностях применен способ построения конечномерных аппроксимаций метода конечных элементов, основанный на продолжении уравнения с поверхности во вмещающее ее пространство.

Практически каждая глава содержит результаты расчетов, которые демонстрируют применимость и возможности разработанных алгоритмов. В заключении диссертации формулируются ее основные результаты. В приложении представлены результаты характерных тестовых численных расчетов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность проведенных исследований, результаты которых представлены в работе, обеспечена использованием в работе обоснованных подходов для построения математических моделей трещиноватых сплошных сред, опирающихся на современные представления теории трещин; использование современных методов и подходов для конструирования вычислительных алгоритмов, проведением значительного количества расчетов, в том числе валидационного характера.

Оценка новизны, научной и практической значимости проведенных исследований

В работе получены следующие новые результаты:

- Новая 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.
- Новые вычислительные алгоритмы для описания эволюции срединной поверхности трещины с использованием метода проекции ближайшей точки, интегрирования по поверхности, вычисления локальных базисов в окрестности трещины. Эволюция поверхности описана непосредственно в терминах эволюции оператора проекции ближайшей точки, без непосредственной аппроксимации поверхности.
- Новый вариант вычислительного алгоритма «расширенного» метода конечных элементов - X-FEM/CP, использующий метод проекции ближайшей точки для представления поверхности и описания ее эволюции.
- Новые вариационные (слабые) постановки начально-краевых задач для решения уравнения смазочного слоя на стационарных и эволюционирующих поверхностях с краем с применением метода проекции ближайшей точки. Построенные постановки основаны на продолжении уравнения на поверхности в трехмерное пространство и вариационном способе учета главных граничных условий на границе трещины.
- Новый 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.

- Новый 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 пороупругой среде и течения в трещине и единую заданную в пространстве эйлерову расчетную сетку, без использования расчетной сетки, заданной на срединной поверхности трещины.
- Оригинальный комплекс программ для моделирования развития флюидонаполненных трещин, реализующий предложенные новые модели и алгоритмы. Эффективность кода показана решениями задач с учетом практически важных особенностей и эффектов, сопровождающих развития трещин гидроразрыва.

В совокупности полученные результаты дают комплексное решение рассмотренной автором задачи о моделировании динамики развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде. Полученные результаты обладают внутренним единством с точки подходов, использованных автором для построения вычислительных алгоритмов решения задачи в связанной постановки. Часть результатов, особенно касающихся предложенных автором новых методов решения начально-краевых задач на поверхностях с краем, имеют независимый интерес и могут быть использованы для решения широкого круга задач в плоских и пространственных областях, геометрия которых эволюционирует, оставаясь, в общем случае, несогласованной с расчетной сеткой.

Разработанные алгоритмы в полной мере реализованы программно, их робастность в различных ситуациях продемонстрирована значительным числом численных расчетов. В силу того, что сделанные автором при построении модели и алгоритмов предположения являются достаточно общими, результаты работы найдут широкое применение для решения широкого круга задач расчета динамики эволюционирующих трещин в материалах и средах техногенного и естественного происхождения.

Таким образом, результаты работы обладают значительной научно-практической значимостью и вносят большой вклад в решение проблемы разработки комплекса средств математического моделирования для анализа развития флюидонаполненных трещин в пороупругой среде. Полученные результаты имеют практическую ценность прежде всего для решения задач прикладной геофизики. В частности, одной из таких задач является моделирование развития трещин в рамках практически важной для нефтегазодобывающей промышленности технологии гидравлического разрыва пласта.

Результаты работы могут быть в дальнейшем применены в области создания новых средств моделирования для решения широкого класса задач геомеханики пористых насыщенных сред, в том числе при наличии крупномасштабной трещиноватости. Конкретными потребителями могут являться академические и отраслевые научно-исследовательские и проектные институты и

организации геофизической направленности, в том числе предприятия и организации нефтегазового комплекса Российской Федерации.

Полнота опубликования и апробации результатов исследований

Основные результаты работы в полной мере представлены в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов исследований, неоднократно докладывались на профильных научных конференциях, в том числе международных. По тематике диссертации опубликована 21 печатная работа в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов, в том числе 15 работ, индексируемых в РИНЦ, 10 работ, индексируемые в базе данных Scopus, 4 работы, индексируемые в базе данных Web of Science. Получено 2 свидетельства регистрации программ.

Замечания по диссертационной работе

К диссертации можно сформулировать ряд замечаний:

1. Математическая модель развития крупномасштабной флюидонаполненной трещины предложена в неизотермической постановке. Вместе с тем описываемые далее вычислительные алгоритмы и результаты моделирования рассматривают только изотермические постановки.

2. В качестве основного вычислительного алгоритма в работе автора используется метод конечных элементов. Для решения задач пороупругости соответствующие конечномерные пространства должны обладать специальными дополнительными свойствами, помимо традиционных свойств аппроксимации - так называемым условиями inf-sup - устойчивости. В работе автора этот вопрос обсуждается. Однако из текста диссертации непонятно, использует ли автор такие пары пространств (например, конечные элементы Тэйлора-Худа).

3. В диссертации приведено достаточное количество численных расчетов, которые демонстрируют возможности предложенных автором алгоритмов. Однако расчеты приведены для сравнительно скромных, с современной точки зрения, сеточных размерностей без конкретизации используемой вычислительной техники. Было бы целесообразно привести расчеты с более мелкими сетками, что более полно демонстрировало бы возможности как предложенных алгоритмов, так и их программной реализации. Также в дальнейшем целесообразно проработать вопросы параллельной реализации предложенных вычислительных алгоритмов.

4. Было бы уместно более детально осветить вопросы, связанные с тем, как определяется расстояние, на которое «продвигаются» точки фронта трещины на шаге по времени и, при необходимости, сформулировать соответствующие критерии и ограничения на разработанные автором алгоритмы.

Сделанные замечания следует трактовать как пожелания автору в плане дальнейшего развития исследований и ни в коей мере не снижают ценность диссертационной работы, значимости полученных в ней результатов и общей положительной оценки работы.

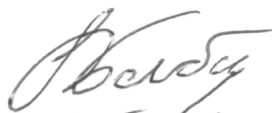
Заключение

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что диссертационная работа Е.Б.Савенкова является научно-квалификационной работой, в которой изложен комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы анализа эволюции состояния естественных и техногенных трещиноватых упругих пористых насыщенных сред. Работа выполнена на высоком научном уровне, ее результаты обладают новизной и научно-технической значимостью. Основные результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и в должной мере отражены в научных публикациях, включая издания из перечня ВАК Минобрнауки РФ (а также в наукометрические базы Scopus и Web of Science). Содержание диссертации и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 01.10.2018) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, **Савенков Евгений Борисович**, безусловно, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре отдела информатизации, математического моделирования и управления ИАП РАН, протокол №2/10 от 15.10.2020.

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.



А.В. Бабаков

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.



Н.Г. Бураго

«10» ноября 2020г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации проектирования РАН»

Адрес: 123056, Москва, 2-ая Брестская ул, д.19/18

Сайт: <http://www.icad.org.ru/>

Телефон: +7 (499) 250-02-62

Факс: +7 (499) 250-89-28, +7 (499) 250-95-54

Эл.почта: icad.org.ru