

**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»

Проблема повышения нефтеотдачи месторождений является важной научно-технологической проблемой. Среди средств воздействия на нефтегазоносные пласты с целью увеличения их нефтеотдачи, одним из наиболее эффективных является применение технологии гидроразрыва пласта. Образование трещин в призабойной зоне вблизи скважины, их насыщение флюидами нефтегазоносного пласта с учетом эффекта пороупругости, является сложным нелинейным гидромеханическим процессом, для которого в настоящее время отсутствуют взаимосвязанные модели и вычислительные методы, позволяющие получать реалистические прогнозы процесса добычи. В диссертационной работе САВЕНКОВА Евгения Борисовича рассматривается комплекс вопросов, связанный с решением важной научно-практической задачи – построения взаимосвязанных моделей фильтрации, упругой деформации порового пространства и на основе этого – математического моделирования динамики развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде, что определяет *актуальность* темы диссертационного исследования.

Работа включает в себя результаты, связанные с построением и исследованием математической модели процесса развития трещины при гидроразрыве пласта, а также результаты, связанные с разработкой комплекса вычислительных средств (алгоритмов и комплекса программ) для ее решения. Предлагаемая математическая модель учитывает все значимые процессы, сопровождающие развитие трещины и является пространственно-трехмерной и нестационарной. Предложенные вычислительные алгоритмы позволяют анализировать процесс развития трещины с учетом основных физически значимых эффектов при естественных допущениях об эволюции ее срединной поверхности, что дает возможность моделировать процесс развития трещины в постановках, приближенных к реальным, с учетом неоднородности как упругих и фильтрационных свойств среды, так и ее прочностных свойств.

Перейдем к краткой *характеристике структуры и содержания работы*. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Объем работы составляет 298 страниц, список источников включает 276 наименований.

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

Первая глава работы посвящена описанию математической модели развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде. Рассматриваются соответствующие постановки задач пороупругости и течения в трещине. Приводится геометрическая модель эволюции ее срединной поверхности, формулируются

критерии развития трещины. Отдельные группы уравнений замыкаются должным образом выбранными условиями согласования, заданными на ее срединной поверхности.

Во второй главе представлен обзор известных вычислительных алгоритмов, в основном - для решения частных задач. Анализируется их применимость для решения полной связанной задачи. С учетом выполненного анализа формулируются общие требования к алгоритмам для решения связанной задачи и ставятся конкретные задачи по разработке новых вычислительных алгоритмов. Разработке этих алгоритмов и их применению посвящена оставшаяся часть работы.

В третьей главе рассмотрены вопросы представления срединной поверхности трещины в модели и вычислительных алгоритмах. Считается, что срединная поверхность является произвольной, «не слишком искривленной» гладкой поверхностью с гладкой границей. Для ее представления используется метод проекции ближайшей точки. Детально описывается суть метода, предложенные автором алгоритмы для описания эволюции срединной поверхности и ряд вспомогательных алгоритмов, используемых в дальнейшем. Приводятся примеры численных расчетов, демонстрирующие возможности предложенного метода.

В четвертой главе рассмотрены методы решения задач пороупругости без трещины и при ее наличии. Подробно рассматриваются вопросы итерационных методов решений уравнений пороупругости и учета граничных условий на поверхности трещины. Описывается предложенный автором вариант метода X-FEM, в котором для описания срединной поверхности трещины используется метод проекции ближайшей точки вместо широко распространенного метода множеств уровня. В конце главы приводятся примеры численных расчетов.

Пятая глава посвящена методам решения уравнений в частных производных на гладких поверхностях с краем. Предложенный метод основан на конечно-элементном развитии ранее применявшегося разностного метода. С этой целью, сначала на примере ряда модельных задач, а далее - для содержательной постановки задачи о течении вязкой жидкости в тонком смазочном слое, рассматриваются новые слабые постановки задачи. Предложенные методы основаны на продолжении уравнения с поверхности во вмещающее ее пространство. Основное место в изложении занимает обоснование постановки граничных условий для продолженного уравнения. В заключении формулируется алгоритм решения задачи на эволюционирующей поверхности с краем в случае, когда характер ее эволюции соответствует развитию трещины.

В шестой главе предлагается, с использованием ранее предложенных результатов, алгоритм решения задачи о развитии флюидонаполненной трещины в пороупругой среде в полной постановке. Глава содержит критический обзор ранее применявшихся алгоритмов. Показывается непригодность или неэффективность их применения для задачи в рассмотренной автором постановке. Предложенный алгоритм базируется на использовании эйлеровых координат. Он использует единую фиксированную пространственную расчетную сетку для решения как трехмерных задач во вмещающей трещину среде, так и двумерной задачи о течении в трещине. Приводятся результаты численных расчетов, демонстрирующих возможности

предложенных алгоритмов, в том числе, при расчете развития трещины в среде с неоднородными свойствами.

Научная новизна работы определяется следующими, полученными автором результатами:

- математической моделью развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде, которая учитывает все основные эффекты, связанные с развитием трещины: поведение вмещающей ее пороупругой среды, течение флюидов в трещине и ее эволюцию;
- сформулированными автором условиями применимости модели, в частности, возможности учета, без дополнительных упрощений, неоднородного распределения фильтрационных, упругих и прочностных свойств среды, возможности эволюции поверхности трещины как произвольной гладкой поверхности, что позволяет применять ее для анализа реалистичных сценариев развития флюидонаполненных трещин, встречающихся на практике;
- разработанным в работе комплексом вычислительных алгоритмов для решения как частных задач, так и для анализа наиболее полной постановки с использованием объединенных моделей; его особенностью является то, что автором используется единый способ представления поверхности, что позволяет строить аппроксимации как трехмерной задачи во вмещающей трещину среде, так и двумерной задачи о течении в эволюционирующей трещине с использованием единой фиксированной расчетной сетки и на основе единого класса алгоритмов метода конечных элементов как базового; построенный алгоритм использует эйлеровы координаты и не требует сложных процедур перестройки сетки; он может применяться для решения задач в тех же допущениях, которые соответствуют предложенной модели, без дополнительных упрощений;
- разработкой комплекса программ, реализующего построенные модели и предложенные численные алгоритмы, который продемонстрировал работоспособность и вычислительную эффективность на решении ряда тестовых и реальных задач.

Основные результаты работы в полной мере представлены в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов исследований, неоднократно докладывались на профильных научных конференциях Всероссийского и международного уровня.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена использованием в работе обоснованных подходов, как при построении математической модели, так при разработке вычислительных алгоритмов. Предложенные методы решения задач прошли убедительную проверку при решении реальных задач развития флюидонаполненных трещин в пороупругой среде.

Результаты работы обладают значительной научно-практической значимостью и вносят крупный вклад в решение поставленной автором задачи - разработке комплекса средств математического моделирования о развитии флюидонаполненных

трещин в пороупругой среде. Ряд результатов диссертации, в частности, новые методы решения уравнений на поверхностях, имеют самостоятельную научную ценность. Полученные результаты имеют практическую ценность прежде всего в области прикладной геофизики, в частности, для дальнейшего совершенствования технологии гидравлического разрыва нефтегазового пласта, и в итоге – для повышения нефтеотдачи нефтегазоносных месторождений.

Достоинством работы является системное исследование и построение моделей процессов фильтрации флюидов в пороупругой среде с учетом основных геофизических факторов, включающих эволюцию трещины, упругую деформацию и прочность порового пространства и др.. Предложенные автором модели и вычислительные методы являются корректными и эффективными, а алгоритмы – робастными. Вопросы построения вычислительных алгоритмов в работе рассматриваются на уровне полной связанной задачи «в целом», а не с точки зрения эффективности отдельных алгоритмов для решения отдельных подзадач, составляющих полную модель процесса развития трещины.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Одним из основных возможных приложений результатов работы является комплекс вычислительных алгоритмов для анализа развития трещин гидроразрыва пласта. Хорошо известно, что жидкостью разрыва в этом случае является так называемый «сшитый гель», который является неньютоновской жидкостью. Вместе с тем, в предложенной автором математической модели при описании течения как в пласте, так и в трещине, используется ньютоновская реология флюида. Было бы уместно рассмотреть в рамках предложенной модели, в том числе, неньютоновскую модель, а также указать ограничения на применение ньютоновской реологии для данного класса задач.

2. Для численной реализации дискретной модели (конечномерной задачи) пороупругости автор применяет итерационные алгоритмы, основанные на последовательном решении групп уравнений теории упругости и фильтрации. Недостатком такого подхода является, в ряде случаев, медленная сходимость дискретного решения. Для оптимизации итерационного процесса в целом, целесообразно было бы рассмотреть методы линеаризации и численного решения конечномерной задачи- объединенной системы уравнений пороупругости и фильтрации. .

3. Рассматриваемый в диссертации класс задач обладает высокой вычислительной сложностью и требует производительностей и объемов оперативной памяти, не достижимых для вычислительных систем с последовательной архитектурой. В связи со сказанным, актуальным является построение параллельных аналогов алгоритмов и программ, разработанных в диссертации.

Сформулированные замечания не снижают заметным образом высокого научного уровня диссертационного исследования Е.Б. Савенкова, ценности выполненной работы, фундаментальной и прикладной значимости полученных в ней результатов.

Оппонент считает, что диссертационная работа Е.Б. Савенкова является законченным исследованием, имеющим важное значение для развития теории и практики математического моделирования сложных геофизических процессов и представляет собой научно-квалификационную работу высокого уровня, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научно-техническая проблема разработки методов и средств математического моделирования динамики развития флюидонаполненных трещин. 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».

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,
заведующий кафедрой «Математика и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Донской государственный технический университет»,

д.ф.-м.н., профессор, член корреспондент РАН  А.И. Сухинов

20.11.2020 г.

344000, г. Ростов-на-Дону, ДГТУ, пл. Гагарина, д. 1, корпус 8, ауд. 408

Телефон: +7 (928) 102-11-06,

Эл. почта: sukhinov@gmail.com

Подпись А.И. Сухинова удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого Совета ДГТУ

