

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Канина Евгения Алексеевича
на тему: «Асимптотические модели процессов массопереноса в задаче
роста трещины гидроразрыва»
по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертация Канина Е.А. посвящена разработке аналитических и численных моделей роста трещины гидроразрыва. Технология гидроразрыва пласта (ГРП) применяется на нефтяных и газовых скважинах в качестве основного метода увеличения нефтеотдачи. В основе технологии лежит процедура создания трещин в коллекторе путем закачки гидроразрывной жидкости в горную породу под высоким давлением через нагнетательную скважину. Планирование гидроразрывных работ проводится при помощи симуляторов, в основе которых лежат математические модели развития трещин ГРП. Математическое моделирование является основным методом исследования трещин гидроразрыва в связи с отсутствием возможности прямого наблюдения эволюции трещины в коллекторе. При этом применяемые при расчетах модели образования и роста трещин ГРП содержат значительные упрощения, что приводит к снижению точности прогнозирования эффективности проведения гидроразрыва. Этим обуславливается **актуальность** темы диссертационной работы.

Как показывает проведенный в диссертации литературный обзор, роль ряда гидродинамических факторов в задаче о росте трещины гидроразрыва, таких как обмен жидкостью между трещиной и пластом, турбулентность течения жидкости внутри части канала трещины и вязкопластическая реология гидроразрывной жидкости, изучена недостаточно детально, несмотря на практическую важность и их значительное влияние на распространение трещины в определенных условиях. В диссертационной работе автор исследует влияние вышеупомянутых гидродинамических

факторов на распространение трещины гидроразрыва, используя модели трещин с полубесконечной и радиальной геометриями.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, объем диссертации 225 страниц, она включает 56 рисунков, 9 таблиц и два приложения. Список цитируемых научных публикаций содержит 132 наименования.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации и описывается степень ее разработанности, формулируются цели работы, решаемые задачи, приводятся защищаемые положения, отражены новизна и практическая значимость исследования, излагаются методы исследования, аргументируется достоверность полученных результатов, даются сведения об апробации и основных публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена формулировкам моделей полубесконечной и радиальной трещин. Перечислены предположения моделей, введены обозначения параметров, выписаны системы уравнений. В дальнейших разделах диссертации автор описывает как предположения и уравнения из главы 1, связанные с массообменом между трещиной и пластом (глава 2) и течением жидкости внутри канала трещины (главы 3 и 4), изменяются для учета изучаемого гидродинамического фактора.

Вторая глава представляет анализ влияния утечек, зависящих от давления, на распространение трещины гидроразрыва. Автор использует предположение об одномерности механизма утечек и учитывает зависимость скорости массообмена от давления внутри канала трещины. В рамках модели полубесконечной трещины получены аналитические решения для предельных режимов распространения трещины, продемонстрированы примеры общих численных решений, построены карты режимов. На основе оценки относительной важности учета зависимости скорости массообмена от давления определены области параметрического пространства, внутри которых построенное решение значительно отличается от результатов модели с утечками по закону Картера. Для трещины гидроразрыва с осесимметричной

геометрией автор реализовал численную схему и применил модель полубесконечной трещины в качестве критерия распространения. Сопоставление построенного решения с характеристиками трещины в модели с утечками по закону Картера позволило определить диапазоны значений определяющих параметров, при которых массообмен, зависящий от давления, важно учитывать при дизайне трещины гидроразрыва. В частности, выявлена особая важность гидродинамического фактора при больших значениях параметра эффективности.

В **третьей главе** рассмотрены модели трещин с полубесконечной и радиальной геометриями, распространяющиеся под влиянием скользкой воды в проницаемой горной породе. Особенности моделей является учет смены режима течения внутри канала трещины из ламинарного в турбулентный с увеличением расстояния от кончика трещины. Анализируя модель полубесконечной трещины, автор вывел новые аналитические предельные решения, характеризующиеся доминированием турбулентного течения. Приведены примеры общего численного решения задачи, продемонстрированы карты режимов для различных значений характеристического числа Рейнольдса, построена диаграмма, отображающая размер ламинарной зоны при различных значениях определяющих параметров. В рамках модели радиальной трещины использована численная схема, в основе которой лежит квадратурное интегрирование методом Гаусса-Чебышева и барицентрическая интерполяция Лагранжа. Показано, что реализация турбулентного течения вблизи ствола скважины способствует большим значениям раскрытия и давления в этой области трещины на протяжении определенного интервала времени от инициализации трещины по сравнению с результатами ламинарной модели. Получены два новых полуаналитических решения для предельных режимов распространения радиальной трещины, характеризующиеся доминированием вязкостных эффектов и турбулентного течения. Построены карты режимов, на которых

дополнительно отображены области, внутри которых решение задачи можно приближенно считать полностью турбулентным или полностью ламинарным.

В четвертой главе рассмотрена задача о росте радиальной трещины под влиянием жидкости с реологией Гершеля-Балкли. Реализованы два подхода для моделирования распространения трещины. Первый численный, а второй быстрый полуаналитический. Построено параметрическое пространство задачи, имеющее форму пирамиды, получены два новых полуаналитических решения для предельных режимов распространения, связанных с доминированием предела текучести. Найдены зоны применимости всех предельных решений, реализующихся в задаче. Рассчитаны зависимости объемной доли, приходящейся на недеформируемое ядро, от времени и определяющих параметров в безразмерных переменных.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы и перспективы дальнейших исследований.

На мой взгляд, следующие результаты, полученные в диссертации, заслуживают упоминания:

1. Описаны физические особенности трещины гидроразрыва, связанные с анализируемыми гидродинамическими факторами.
 - Массообмен, зависящий от давления, способствует формированию зоны циркуляции поровой жидкости, конечному значению давления жидкости на фронте трещины и увеличению интенсивности утечек в пласт вдоль основной части радиальной трещины по сравнению с законом утечек Картера. При учете зависимости массообмена от давления формируется более короткая и менее раскрытая радиальная трещина по сравнению с характеристиками трещины в модели с утечками по закону Картера.
 - При распространении радиальной трещины гидроразрыва под воздействием ламинарно-турбулентного течения турбулентный режим реализуется вблизи ствола нагнетательной скважины, а ламинарная зона расположена вблизи кончика трещины. Размер

ламинарной области увеличивается с течением времени. Турбулентное течение влияет на профили раскрытия и давления возле скважины в начальный период распространения трещины, причем увеличение интенсивности утечек продлевает данное воздействие.

- Вязкопластическая реология гидроразрывной жидкости приводит к формированию недеформируемого ядра посередине канала трещины. Со временем объемная доля, приходящаяся на ядро, растет. Продемонстрировано, что радиальная трещина, движущаяся под влиянием жидкости Гершеля-Балкли, имеет меньший радиус и большее раскрытие по сравнению с параметрами трещины в модели со степенной гидроразрывной жидкостью.
2. Получены, где это было возможно, аналитические и полуаналитические решения для предельных режимов распространения полубесконечной и радиальной трещин. На основе предельных решений и общего численного решения каждой из задач построены карты режимов, которые дают представление о физических процессах, происходящих вблизи кончика трещины и доминирующих при распространении радиальной трещины. Описаны изменения характеристик полубесконечной трещины (профили раскрытия и давления) и радиальной трещины (радиус, эффективность, профили раскрытия и давления), возникающие при варьировании значений определяющих параметров.
 3. Проведено сравнение построенных решений для радиальной трещины с классическими. В случае массообмена, зависящего от давления, выполнено сопоставление с результатами расчетов по модели с утечками по закону Картера. Характеристики радиальной трещины, распространяющейся под влиянием ламинарно-турбулентного течения, сравнивались с соответствующими параметрами ламинарной модели. В случае вязкопластической реологии жидкости гидроразрыва решения сравнивались с результатами модели радиальной трещины, движущейся

под влиянием степенной жидкости. Сопоставления позволили автору найти диапазоны значений определяющих параметров, при которых изучаемый гидродинамический фактор оказывает значительное воздействие на эволюцию радиальной трещины и его необходимо учитывать при дизайне.

Результаты диссертации являются новыми, оригинальными и достоверными. Достоверность обеспечивается применением математических моделей, основанных на классических законах гидромеханики и геомеханики, тестированием реализованных численных алгоритмов, сопоставлением полученных решений с результатами исследований других авторов. Разработанные в диссертации модели могут быть применены для расчета эволюции трещины гидроразрыва на начальном этапе закачки, а также могут быть востребованы в развитии программного обеспечения для дизайна трещин и планировании работ по гидроразрыву пласта, что обуславливает практическую значимость результатов диссертации.

Результаты работы Канина Е.А. получили апробацию на ряде международных и российских конференций и научных семинарах. На основе проведенных исследований были опубликованы 5 печатных работ, 3 из которых в рейтинговых международных журналах, индексируемых научными базами Web of Science и Scopus.

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, написана хорошим языком, логично структурирована, результаты понятно изложены, рисунки и таблицы наглядно представляют соответствующую им информацию. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы», а именно следующим ее направлениям: реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях; ламинарные и турбулентные течения; течение жидкостей и газов в пористых средах; пограничные слои, слои смешения, течения в следе; точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и

кинетических моделей однородных и многофазных сред; разработка математических методов и моделей гидромеханики. Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает содержание диссертационной работы.

Имеются следующие замечания:

1. Используемый термин «полубесконечная» трещина не является интуитивно понятным, хотелось бы видеть более точное его определение. Расстояние в рассматриваемых задачах отсчитывается от кончика трещины, но остается неясным, где находится источник, на бесконечно большом расстоянии?
2. На ряде графиков диапазон изменения нормированных величин составляет 10^{18} . Хорошо бы пояснить физическую реальность таких вариаций.
3. Хотелось бы увидеть сопоставление с данными лабораторных экспериментов, либо объяснение невозможности такого сопоставления с существующими лабораторными данными и предложения по постановке специальных экспериментов.

Высказанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Канин Евгений Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской
академии наук (ИДГ РАН)
Турунтаев Сергей Борисович



«25» мая 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-79-39, e-mail: stur@idg.chph.ras.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы
поиска полезных ископаемых»

Адрес места работы:

119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН
Тел.: +7 (495) 939-79-39, e-mail: stur@idg.chph.ras.ru

Подпись директора ИДГ РАН С.Б. Турунтаева удостоверяю:

ученый секретарь ИДГ РАН,
к.ф.-м.н.



Д.Н. Локтев

«25» мая 2023 г.