

**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»**

**Актуальность темы диссертации.** Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из основных современных методов интенсификации добычи жидких углеводородов. Кроме этого, гидроразрыв может происходить самопроизвольно при закачке в пласт флюидов (поддержание пластового давления, хранение флюидов, утилизация жидких отходов). В этой связи актуальными являются математические модели, позволяющие управлять процессом закачки для оптимизации или предотвращения появления и развития трещины ГРП. Сложность моделирования состоит в мультифизичности задачи, высокой степени неопределенности параметров, а также технологическим требованиям на скорость расчетов. Несмотря на давнюю историю развития тематики, в ней все еще имеется широкий круг открытых вопросов для научной проработки. К ним относятся направления, изучаемые в диссертации Е.А. Канина, состоящие из учета следующих гидродинамические эффекты:

- массообмен между трещиной и пластом при учете зависимости скорости массообмена от давления внутри канала трещины,
- смена режима течения внутри канала трещины от ламинарного к турбулентному с увеличением расстояния от кончика трещины,
- вязкопластическая реология жидкости гидроразрыва.

Анализ проводится на основе модели полубесконечной трещины, известной также как модель концевой элемента, и модели радиальной (осесимметричной) трещины. Проведенные исследования необходимы для лучшего понимания механизмов раскрытия трещины ГРП, настройки технологических процессов, совершенствования коммерческих симуляторов

ГРП. Таким образом, задачи диссертационной работы, связанные с разработкой численных моделей роста трещины гидроразрыва пласта, являются актуальными.

**Краткий анализ содержания работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Ее объем составляет 225 страниц, в том числе 56 иллюстраций и 9 таблиц. Список литературы включает 132 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, представлен обзор литературы, приведены цели и задачи работы, дается резюме полученных результатов, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, аргументируется достоверность результатов, излагаются методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** описаны постановки задач и системы уравнений для модели полубесконечной трещины (**раздел 1.1**) и модели радиальной трещины (**раздел 1.2**). Формулировки моделей основываются на предположениях, распространенных в литературе, в связи с чем названы в диссертации классическими. Данная глава является базовой для последующих глав 2–4, в которых излагаются только модификации формулировок главы 1, позволяющие учесть интересующий гидродинамический фактор при моделировании распространения трещины гидроразрыва.

В **главе 2** проводится модификация модели раскрытия трещины ГРП, учитывающая не только фильтрационные утечки жидкости в окружающую среду, но и приток жидкости из среды в кончик трещины, а также зависимость утечек от неоднородного распределения давления внутри трещины. Анализируется влияние этих факторов на распространение трещин с полубесконечной и осесимметричной постановках. Результаты сравниваются с классической моделью утечек Картера, в котором пренебрегается отличием между давлением жидкости внутри канала трещины и горным давлением. Для вывода аналитического выражения для скорости массообмена между трещиной и пластом предполагается, что утечки происходят только в

перпендикулярном к трещине направлении и не связаны вдоль трещины. Для зоны циркуляции поровой жидкости вблизи кончика трещины, рассматриваемой в **разделе 2.1**, получены формулы для конечного значения давления на фронте трещины и аналитические решения для предельных режимов распространения полубесконечной трещины. Построены карты режимов, отображающие границы применимости предельных решений, на которых выделены области, где важно учитывать зависимость массообмена от давления. В **разделе 2.2** рассматривается модель радиальной трещины. Динамика роста радиальной трещины рассчитывалась численно. Получено, что радиальная трещина имеет меньший радиус и раскрытие по сравнению с предсказаниями модели с утечками по закону Картера из-за большего объема утекающей в коллектор жидкости в случае утечек, зависящих от давления.

В **главе 3** анализируется влияние турбулентной зоны при закачке жидкости ГРП с пониженным сопротивлением течению. Автор использует асимптоту Вирка, характеризующую предел снижения сопротивления, для описания реологических особенностей турбулентного течения. **Раздел 3.1** посвящен модели полубесконечной трещины. Для предельных режимов распространения найдены аналитические решения, а примеры общих решений рассчитаны численно. Приведены карты режимов, исследована зависимость расстояния между кончиком трещины и точкой трансформации режима течения от значений определяющих параметров. Сделан вывод, что увеличение интенсивности оттока в пласт приводит к уменьшению размера ламинарной зоны и большему влиянию турбулентного режима течения на параметры полубесконечной трещины. В **разделе 3.2** рассматривается модель радиальной трещины. Численное моделирование показало воздействие ламинарно-турбулентного течения на характеристики радиальной трещины на начальном этапе распространения, приводящее к меньшему значению радиуса трещины, большим значениям раскрытия и давления вблизи ствола нагнетательной скважины. Сделан вывод от том, что утечки продлевают влияние турбулентного режима течения на профили раскрытия и давления.

Продемонстрировано, что со временем размер ламинарной области, находящейся возле кончика трещины, увеличивается. Автор получил решения для предельных режимов распространения радиальной трещины при помощи численно-аналитического метода и установил их области применимости.

В главе 4 изучается влияние вязкопластической реологии гидроразрывной жидкости на динамику роста осесимметричной трещины в проницаемом коллекторе. Реология жидкости гидроразрыва описывается моделью Гершеля-Балкли, являющейся обобщением степенной реологической модели и учитывающей наличие предела текучести. Численное решение задачи показало, что радиальная трещина более короткая и раскрытая по сравнению со случаем жидкости гидроразрыва со степенной реологией. Помимо численного алгоритма автор реализовал быстрый приближенный полуаналитический подход. Установлено наличие двух новых предельных режимов распространения, связанных с доминированием предела текучести при росте трещины, по сравнению с моделью радиальной трещины, распространяющейся под влиянием степенной жидкости. В главе построены карты с областями применимости предельных решений, а также выполнены количественные оценки роста объемной доли недеформируемого ядра, формирующегося посередине канала трещины, где напряжение сдвига ниже предела текучести.

В приложении А продемонстрированы результаты верификации численного алгоритма, основанного на квадратуре Гаусса-Чебышева и барицентрической форме интерполяции Лагранжа, который автор использует для моделирования эволюции радиальной трещины.

В приложении Б приведены решения для предельных режимов распространения радиальной трещины в случае вязкопластической жидкости гидроразрыва.

В заключении подведены итоги проведенных исследований, сделаны основные выводы по результатам диссертации, даны советы по их практическому применению, указаны потенциальные направления для

дальнейших исследований в области численного моделирования процесса гидроразрыва пласта.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Задачи, изученные в диссертации, связаны между собой проблемой разработки численных моделей роста трещины гидроразрыва пласта и построения частных аналитических и полуаналитических решений для предельных режимов распространения трещины гидроразрыва.

**Научная новизна диссертационной работы.** Результаты, указанные в качестве основных в диссертации, являются новыми. Результаты диссертации представляют как теоретический интерес в области моделирования процедуры гидроразрыва пласта, так и обладают практической значимостью. Построенные в диссертации карты режимов дают дополнительную информацию о режимах раскрытия трещин гидроразрыва, а также могут использоваться для уточнения коммерческих симуляторов ГРП. Построенные в диссертации модели радиальной трещины с учетом зависящего от давления флюидообмена с пластом, могут быть использованы для настройки методик интерпретации данных мини-ГРП, а модели полубесконечной трещины – для уточнения симуляторов ГРП, основанных на методе поверхностей уровня.

Можно выделить следующие результаты работы.

1. Детально проанализированы режимы течения с учетом зависимости фильтрационных утечек от давления жидкости внутри трещины. В частности, сделан учет зоны циркуляции поровой жидкости вблизи фронта трещины. Такая модель более соответствует реальной физической картине, поскольку в ней давление в кончике трещины конечно. Показано, что в данном подходе суммарные утечки из трещины выше, чем в традиционном подходе с законом утечек Картера, что сказывается на длине создаваемой трещины.
2. Найдены диапазоны значений определяющих параметров в моделях полубесконечной и радиальной трещин, при которых важно

учитывать зависимость массообмена от давления, и, наоборот, найдены случаи, при которых гидродинамическим фактором можно пренебречь и пользоваться моделями с законом утечек Картера.

3. Продемонстрировано, что при распространении трещины гидроразрыва под воздействием жидкости с пониженным сопротивлением, внутри трещины существуют зоны и ламинарного и турбулентного режимов течения. Турбулентное течение реализуется вблизи ствола нагнетательной скважины и воздействует на характеристики трещины в этой области в начальный период роста трещины. Построены карты предельных режимов распространения для моделей полубесконечной и радиальной трещин, распространяющихся под влиянием ламинарно-турбулентного течения. Дана оценка характерного времени влияния турбулентной зоны в режимах закачки, близких к промысловым.
4. Показано, что вязкопластическая реологии жидкости гидроразрыва приводит к формированию недеформируемого ядра посередине канала трещины, и его объем увеличивается с течением времени. Получено, что радиальная трещина, распространяющаяся под влиянием жидкости с реологией Гершеля-Балкли, имеет меньший радиус и большее раскрытие по сравнению со случаем степенной жидкости гидроразрыва. Построены карты режимов, на которых выделены области доминирования предела текучести, означающие важность его учета при моделировании роста трещины.

#### **Степень достоверности результатов проведенных исследований.**

Достоверность результатов обеспечивается использованием общепринятых в гидромеханике и линейной теории упругости физических законов при формулировании математических постановок задач. Корректность численных расчетов подтверждается сравнением полученных результатов с известными решениями из литературы. Материалы диссертационной работы докладывались автором на большом количестве всероссийских и

международных конференций и на специализированных научных семинарах. Хорошо, что на ряд замечаний, высказанных на семинаре под моим руководством, в диссертации даны исчерпывающие ответы. Основные результаты диссертации изложены в 5 научных статьях, 3 из которых опубликованы в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

Название диссертации точно представляет тему исследования. В свою очередь, содержание диссертации полностью 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 соответствует тексту диссертации, содержит все ключевые результаты, написан кратко и доступно.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Найденные автором в главе 2 зависимости для фильтрационных утечек жидкости из трещины получены в предположении одномерности фильтрационного течения в направлении перпендикулярно трещине. Однако при учете зависимости утечек от давления внутри трещины и наличия зоны рециркуляции в окрестности кончика трещины, фильтрационное течение в пласте будет иметь компоненту скорости вдоль трещины. В работе не дана оценка величины этой компоненты для подкрепления сделанного предположения.
2. Рекомендую сравнить результаты расчетов по предложенной в Главе 2 модели с прямым расчетом по модели, учитывающей

неоднородные утечки в пласт для дополнительной проверки модели и уточнения выделенных областей безразмерных параметров, в которых зависимость утечек от давления является существенной.

3. Для рассматриваемых в Главе 3 решений с высоким числом Рейнольдса в окрестности скважины не учитывается неоднородность течения, вызванная наличием перфораций и генерируемых ими струй жидкости. Кроме того, в случае существенных утечек в пласт возможна перестройка структуры течения по сечению трещины, связанная с уменьшением пограничного слоя на стенках, что повлияет на ламинарно-турбулентный переход. Эти эффекты можно исследовать в будущем при развитии работы.

**Заключение.** Указанные 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, определённым пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной 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, профессор РАН,



профессор кафедры теоретической механики механико-математического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

Головин Сергей Валерьевич



«26» мая 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (913) 925-54-66, e-mail: s.golovin@g.nsu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.01.02 – «Дифференциальные уравнения»

Адрес места работы:

630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1  
НГУ, механико-математический факультет, кафедра теоретической механики  
Тел.: +7 (913) 925-54-66, e-mail: s.golovin@g.nsu.ru

