

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ

им. М.А. Лаврентьева

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(ИГиЛ СО РАН)

Академика Лаврентьева проспект, 15, Новосибирск, 630090
Тел./факс: (383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru
ОКПО 03533978; ОГРН 1025403648600;
ИНН/КПП 5408100064/540801001



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГиЛ СО РАН

д.ф.-м.н. Ерманюк Е.В.

06 марта 2023 г.

06 МАР 2023 № 15320-16-25-160

На № _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Лапина Василия Николаевича
«Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ»

Актуальность темы диссертации

Моделирование трещин, развивающихся под действием нагнетаемой жидкости, в частности трещин гидроразрыва пласта (ГРП) является важной технологической и научной задачей. Сложность решения такой задачи связана с ее физической и геометрической нелинейностью, а также мультифизичностью происходящих процессов. Таким образом, основным инструментом моделирования в этой области является численный анализ. Технологические применения ГРП накладывают жесткие ограничения на время счета, поэтому в коммерческих симуляторах, служащих основным драйвером развития моделирования, в основном применяются упрощенные модели, накладываются ограничения на форму трещины. При этом, во многих вопросах, в частности, связанных с инициированием трещины ГРП, определяющую роль играет пространственное распространение трещины, зависящее от конструкции и напряженного состояния скважины, реологии и режима закачки жидкости, свойств материала горных пород и проч. Поэтому развитие методов моделирования роста пространственных трещин гидроразрыва и решение рассматриваемых в работе конкретных задач, учитывающих реальные физические и технологические аспекты, является актуальным с научной и инженерной точек зрения.

Краткий анализ содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения.

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследований, формулируются цели и задачи исследования, перечисляются выносимые на защиту положения и публикации по теме работы.

В первой главе формулируется задача о распространении трещины, вызванной закачкой вязкой жидкости, приводится обзор классических и современных подходов к ее решению, описывается концепция трехмерной модели для развития трещины гидроразрыва на начальном этапе. Особенности модели являются отсутствие ограничений на форму поверхности трещины, учет отставания фронта жидкости от фронта трещины и учет наличия скважины при расчете напряженно-деформированного состояния при описании роста трещины под действием закачиваемой жидкости. В этой же главе представлены алгоритм численного решения уравнений модели и характеристики программного комплекса, его реализующего.

Во второй главе предлагается неявный глобальный критерий распространения трещины. В предлагаемом методе одновременно рассчитывается положение всех точек фронта таким образом, чтобы удовлетворялись критерий высвобождения упругой энергии и принцип локальной симметрии. Одновременность расчета всего фронта позволяет учитывать взаимное влияние точек фронта, а рассмотрение напряженно-деформированного состояния после приращения трещины – описывать трещины с изломами траектории. Проводится валидация критерия путем сравнения с результатами экспериментов расчетами других авторов.

В третьей главе предлагается и обосновывается численная модель движения жидкости сложной реологии в трещине, позволяющая описывать течение неньютоновской жидкости в приближении Гершеля-Балкли и слабосжимаемой жидкости на основе одного численного алгоритма. Проводится верификация численного алгоритма путем сравнения с аналитическими решениями и демонстрации сеточной сходимости. Здесь же дана оценка границ применимости модели ньютоновской жидкости и моделей, не учитывающих отставание фронта жидкости, для задач описания начального этапа распространения трещины гидроразрыва.

Четвертая глава посвящена описанию верификации предложенной трехмерной модели трещины и ее применению для описания распространения трещин в реалистичных условиях. На основе анализа результатов численного моделирования для трещин различных типов получены количественные характеристики эффекта «пережатия» трещины в окрестности скважины и оценки его влияния на дальнейшее распространение трещины.

В пятой главе на основе серии упрощающих предположений о геометрии трещины строится иерархия моделей трещин: распространяющейся по заданной поверхности, плоской трехмерной, плоскорadiaльной, модель плоской длинной трещины постоянной высоты. С помощью элементов иерархии решены практические задачи: исследована чувствительность гидроизоляции скважины к параметрам пробки и пласта, разработан метод определения параметров трещиновато-пористой среды по данным о потерях бурового раствора.

В заключении формулируются результаты диссертационной работы и практические рекомендации, полученные в ходе исследования и перспективы дальнейшей разработки темы.

Приложение содержит акт об использовании результатов диссертационной работы в технологической компании «Шлюмберге».

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов проведенных соискателем исследований, определяется использованием в качестве основы моделирования фундаментальных законов механики твердого тела, механики разрушения, механики жидкости и выбором теоретически обоснованных численных методов, верифицированных на задачах, имеющих аналитические решения. Достоверность также обеспечивается хорошим согласованием результатов вычислительных экспериментов с известными экспериментальными данными и расчетами других исследователей.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертационной работы заключается следующем.

1. Отличительной особенностью новой разработанной модели является описание напряженно-деформированного состояния материала в окрестности скважины и искривленной трещины в полной трехмерной постановке одновременно с расчетом течения в них жидкости сложной реологии.
2. Впервые автором разработана модель и реализован численный метод для описания движения жидкости сложной реологии в криволинейной трещине гидроразрыва пласта. Предложен единый подход для описания движения несжимаемой неньютоновской жидкости с реологией Гершеля-Балкли и слабосжимаемой ньютоновской жидкости, заключающийся в сведении уравнений движения к одному нелинейному дифференциальному уравнению для давления.
3. Предложен и валидирован новый неявный критерий выбора направления и величины приращения трещины сложной геометрии, в котором одновременно строится положение всего фронта трещины. Это позволяет описывать взаимное влияние распространения в разных точках фронта, учитывать сложное анизотропное поле напряжений в его окрестности и описывать распространение трещины вдоль траекторий, содержащих изломы.
4. Разработан новый вычислительный алгоритм решения полной связанной задачи, получающейся при аппроксимации уравнений трехмерной модели развития трещины, нагруженной давлением движущейся вязкой жидкости. Алгоритм позволяет решать систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с двумя свободными границами итерационно, требуя решения систем только линейных уравнений на каждой итерации.
5. Впервые на основе трехмерного численного моделирования получено количественное описание эффекта пережатия трещин разных ориентаций, вызванного искривлением их поверхности. Показано влияние на пережатие внешних факторов, определены области применимости моделей, использующихся для его описания, проведена оценка его влияния на дальнейший процесс распространения трещины.
6. Предложены решения практических задач 1) о стойкости гидроизоляции скважины с помощью математического моделирования распространения трещины по границе обсадной колонны и цементной пробки и 2) об оценке параметров системы естественных трещин на основе модифицированной модели радиальной трещины и данных о потерях бурового раствора.

Научная и практическая значимость проведенных исследований

В совокупности полученные результаты дают комплексное решение рассмотренной автором задачи о моделировании динамики развития криволинейной трещины, распространяющейся под действием закачки вязкой жидкости. Полученные результаты обладают внутренним единством с точки зрения подходов, использованных автором для построения вычислительных алгоритмов решения задачи в связанной постановке. Часть результатов, касающаяся нового алгоритма решения связанных задач трехмерной модели трещины гидроразрыва, имеет независимый интерес и может быть использована для широкого круга задач включающих нелинейные дифференциальные уравнения в областях с движущимися границами. Предложенный и валидированный критерий распространения трещины может быть использован для описания трещин различных видов, не ограничиваясь трещинами гидроразрыва пласта в условиях сложного нагружения. Неявный алгоритм реализации критерия обеспечивает устойчивость траектории трещины и позволяет объем необходимых вычислительных ресурсов за счет уменьшения количества шагов распространения. Модель движения жидкости в трещине алгоритм ее реализации может

применяться для описания течения несжимаемой и слабосжимаемой жидкости сложной реологии в произвольном узком канале переменного сечения.

Разработанные новые алгоритмы в полной мере реализованы в виде комплекса программ, их точность верифицирована, а надежность подтверждена достаточным количеством численных расчетов. В силу того, что лежащие в основе моделей предположения о геометрии трещины являются достаточно общими, результаты работы найдут широкое применение для решения широкого круга задач об описании распространения заполненных жидкостью трещин в различных материалах.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена возможностью использования ее результатов (методик, алгоритмов, их программной реализации и результатов расчетов) в ряде прикладных областей нефтегазовой промышленности и горного дела, для моделирования распространения трещин в технических конструкциях. Выявление области применимости модели несжимаемой ньютоновской жидкости при описании движения жидкости в узком канале переменного сечения позволяет повысить эффективность моделирования за счет использования более простых моделей.

Таким образом, результаты работы обладают научно-практической значимостью и вносят существенный вклад в решение задачи разработки комплекса методов для математического моделирования развития трещин, заполненных вязкой жидкостью. Конкретными потребителями могут являться академические и отраслевые научно-исследовательские и проектные институты, в том числе предприятия отечественного нефтегазового комплекса.

Полнота опубликования и апробации результатов исследования

Основные научные результаты диссертации полностью изложены в 11 работах в рецензируемых научных изданиях, в которых согласно требованиям ВАК должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. Также результаты диссертационной работы опубликованы в монографии и 6 изданиях, входящих в международные наукометрические базы WoS и Scopus. Работа обсуждалась на более чем 20 всероссийских и международных конференциях и научных семинарах.

Замечания по диссертационной работе

К содержанию диссертации имеется ряд замечаний:

1. Предложенный в главе 1 алгоритм расчета продвижения трещины предполагает ненулевое продвижение фронта трещины вдоль всей её границы. Это предположение справедливо для распространения трещины в однородной среде, но может быть не выполнено, когда трещина встречается с неоднородностями: тогда граница может остановиться или даже двигаться обратно при локальном смыкании трещины. Типичные ситуации из нефтедобычи: ограничение роста трещины по вертикали при встрече с границами коллектора или прорыв трещины в соседние горизонты, сопровождаемое фрагментарным закрытием уже созданной трещины. Для большей практической ценности приведенный алгоритм нужно доработать до возможности описания локальной остановки и смыкания трещины.
2. При расчете дисковой трещины с перегибом в главе 2 показан спектр возможных форм трещины при различных значениях параметра β из критерия разрушения. Остается открытым вопрос о том, какое же значение β наиболее соответствует реальной трещине?

3. Судя по приведенным на рис. 5.5 графикам, продвижение трещины отслоения цементной пробки от обсадной колонны вдоль оси скважины останавливается в случае задания постоянного фиксированного давления жидкости внутри трещины. В то же время эта ситуация схожа с развитием трещины гидроразрыва в трехслойном пласте с более высокими сжимающими напряжениями в верхнем и нижнем слоях (их роль здесь играет взаимное влияние боковых частей трещины, охватывающих пробку). В трехслойном пласте трещина, инициируемая постоянным давлением на забое, при отсутствии утечек может расти бесконечно. В рассматриваемом случае с пробкой этот эффект будет даже усиливаться за счет уменьшения гидростатических сжимающих напряжений вверх по стволу скважины. Неясен физический механизм, препятствующий продвижению трещины вдоль пробки.
4. Построенные в разделах 5.3 и 5.6 одномерные модели переноса проппанта в дисковой и прямой трещинах не позволяют описывать существенный на практике эффект развития неустойчивости Саффмана-Тейлора при переносе проппанта, что в совокупности с ограничением на геометрию трещины снижает практическую ценность полученных результатов. Эксперименты показывают, что при закупоривании трещины по механизму I (образование пробки в средней части трещины) в силу указанной неустойчивости жидкость пробивает каналы и размывает пробку, что не может быть описано в рамках одномерных моделей. Кроме того, дисковые трещины ГРП с радиусом в десятки метров редко реализуются на практике.

Указанные замечания могут быть устранены при дальнейшем развитии исследований автора и не влияют на общее положительное впечатление от работы.

Заключение

Диссертация Лапина В.Н. «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложен комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы анализа распространения трещин и имеющих большое значение для развития таких отраслей науки как механика трещин, горное дело и методы вычислений. Основные результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях, научных семинарах, в должной мере отражены в научных публикациях, входящих в перечень ВАК Минобрауки России и международные наукометрические базы. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» удовлетворяет требованиям п.п. 9, 10, «Положения о порядке ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Лапин Василий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа Лапина В.Н. «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» и отзыв ведущей организации обсуждались 14.12.2022 г. на общеинститутском семинаре «Прикладная гидродинамика» (Протокол № 33)

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук. В работе семинара приняло участие 25 человек, в том числе 9 докторов наук, 11 кандидатов наук. Отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Отзыв подготовил:

Заведующий лаборатории цифровых и интеллектуальных систем добычи углеводородов
доктор физико-математических наук, профессор РАН
Головин Сергей Валерьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН)
Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, д.15
Телефон: +7 (383) 330 16 12
E-mail: igil@hydro.nsc.ru

Подпись Головина Сергея Валерьевича заверяю
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н. Хе Александр Кайчерович
06 марта 2023 г.

