

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертационную работу

Валова Александра Викторовича

«Математические модели и асимптотический анализ гидравлических и интерфейсных трещин в слоистых пороупругих средах»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа А.В. Валова выполнена в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН и посвящена построению математических моделей, асимптотических решений и вычислительных алгоритмов, описывающих распространение гидравлических трещин в слоистых пороупругих средах, а также интерфейсных трещин отслоения по границе разнородных материалов.

Актуальность темы. Рассмотренные в работе задачи относятся к моделированию трещин гидроразрыва в пороупругой среде и относятся к описанию ключевых физических процессов при технологических операциях с нефтегазовой скважиной. Первая — гидравлический разрыв слоистого пласта (ГРП), характеризующегося контрастом сжимающих напряжений между слоями. Вторая — долговременная герметичность обсаженных скважин при геологическом захоронении CO_2 , где отслоение цементного камня вдоль его границ является одним из наиболее вероятных путей утечки. Успешность технологических операций на практике всегда оценивается только по достигнутым результатам, поэтому математическое моделирование остаётся основным инструментом обоснования проектных решений и оценки рисков. При этом инженерная практика требует серийных расчётов, что жёстко ограничивает допустимые вычислительные ресурсы. В этой связи актуальными являются эффективные численные методы, основанные на сочетании сеточных методов с асимптотическими решениями в области свободных границ.

Основные научные результаты. Первая часть работы посвящена построению модели развития плоской трещины ГРП Planar 3D на основе алгоритма неявного отслеживания фронта трещины (implicit level set algorithm – ILSA). Известный в литературе алгоритм Planar 3D ILSA базируется на асимптотическом решении для полубесконечной гидравлической трещины в однородном пласте. Однако на практике пласты характеризуются слоистой структурой, характеризующейся контрастом напряжений в различных слоях. При этом инженеры для экономии времени зачастую выбирают расчетную сетку с 1-2 ячейками на каждый слой, что приводит к значительным ошибкам в решении.

В диссертации предложены и сравнены между собой три подхода к построению асимптотического решения для трещины, распространяющейся через слои с различными сжимающими напряжениями. По результатам сравнения наиболее удачной оказалась аппроксимация несингулярной интегральной формулировки обыкновенным дифференциальным уравнением: она сохраняет точность во всех режимах распространения — трещиностойкости, вязкости и утечек — при затратах, допускающих её использование непосредственно в алгоритме отслеживания фронта. Получена оценка размера области вблизи вершины, в которой асимптотика остаётся справедливой, и показано, что эта область резко сокращается по

мере удаления фронта от границы слоя. Для её расширения введён коэффициент релаксации напряжений, эффективно уменьшающий амплитуду скачка напряжений, и построено его обобщение на трещину конечных размеров с произвольным расположением слоёв и произвольным режимом распространения.

Разработана модификация модели Planar 3D ILSA, использующая построенную асимптотику в качестве условия распространения; на случай многослойной среды обобщены определение положения фронта, вычисление объёма жидкости и утечек в концевых элементах. Алгоритм верифицирован на эталонных решениях для радиальной трещины и валидирован по лабораторным экспериментам на блоках из полиметилметакрилата с профилированной поверхностью, воспроизводящей слоистость по напряжениям. Исследование сходимости показало существенный выигрыш в точности геометрии трещины на грубых сетках, характерных для инженерных расчётов.

Рассмотрена задача об одновременном распространении нескольких трещин вдоль наклонной скважины. Аналитически оценён вклад отбрасываемых касательных разрывов смещений (не более 13.5 % для эффективной жёсткости отдельной трещины и 3.7 % для их взаимного влияния), что строго обосновывает используемое упрощение. Показано, что наклон скважины и связанное с ним смещение точек закачки приводят к формированию существенно асимметричных трещин.

Во второй части работы рассматривается другой тип гидроразрыва, в котором путь трещины определяется слоистостью среды, в которой распространяется трещина. А именно, разработана трёхмерная модель интерфейсной трещины гидравлического отслоения цементного камня при закачке CO_2 , учитывающая термopopoупругое деформирование системы «обсадная колонна — цемент — порода», анизотропию пластовых напряжений, слоистость породы, эксцентриситет колонны и начальное напряжённое состояние, обусловленное строительством скважины и гидратацией цемента. Ключевая идея моделирования — сведение трёхмерной механической задачи к последовательности двумерных задач в поперечных сечениях скважины, сопряжённых с одномерной моделью вертикального распространения трещины через приближение локальной упругости.

А.В. Валовым обнаружены три характерных режима профиля раскрытия трещины отслоения в поперечном сечении скважины — серповидное частичное отслоение, развитое неполное отслоение с немонотонным раскрытием и полное отслоение, — причём переходы между ними имеют характер скачкообразных бифуркаций. Установлены закономерности влияния ползучести горной породы, температуры закачиваемой жидкости и эволюции пластовых условий на риск отслоения.

Научная новизна. Новизна работы не сводится к обобщению известных схем на более сложную геометрию. Проблема пересечения фронтом трещины границы слоя с иным уровнем сжимающих напряжений долгое время оставалась узким местом моделей Planar 3D: существовавшие подходы либо требовали дорогостоящего решения нелинейного интегрального уравнения, либо теряли точность при заметном влиянии вязкой диссипации. Предложенная соискателем ОДУ-аппроксимация впервые снимает эту альтернативу, а коэффициент релаксации напряжений превращает локальное по своей природе асимптотическое ре-

шение в рабочее условие распространения на сетках, размер ячейки которых сопоставим с размером слоя. Во второй части работы новизна состоит в самой конструкции модели: одновременный учёт термопоупругих эффектов, трёхмерного характера отслоения и начального напряжённого состояния ранее достигался лишь ценой затрат, исключающих параметрические исследования.

Значимость для приложений. Практическая ценность работы подтверждена внедрением: разработанная модель включена в состав российского симулятора «Кибер-ГРП» в качестве основной расчётной модели распространения плоских трещин гидроразрыва, что имеет прямое значение для технологической независимости отрасли в области проектирования ГРП. Лежащий в основе алгоритмов способ защищён патентом РФ на изобретение № 2786303, два расчётных модуля зарегистрированы как программы для ЭВМ. Вторая часть работы отвечает запросу проектов геологического захоронения CO_2 , где требования по межпластовой изоляции распространяются на десятилетия, а цементный камень практически недоступен для инспекции и ремонта: полученные результаты позволяют оценивать риск утечки при различных условиях цементирования, режимах закачки и напряжённом состоянии пласта. Постановка задачи и результаты неоднократно обсуждались со специалистами компаний нефтегазового сектора в контексте возможного применения модели для оценки рисков полигонов геологического хранения CO_2 .

Апробация и публикации. Основные результаты опубликованы в четырех статьях в рецензируемых журналах первой четверти, еще одна статья выполнена соискателем единолично. Результаты доложены на всероссийских и международных конференциях и семинарах, в том числе на XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики.

Авторский вклад. За время работы над диссертацией А. В. Валов проявил себя как самостоятельный, зрелый и работоспособный исследователь. Все основные результаты и математические модели получены им самостоятельно. Отмечу редкое для молодого исследователя сочетание качеств: свободное владение аппаратом асимптотического анализа и одновременно способность довести результат до работающего и внедрённого программного кода. Соискатель самостоятельно ставит промежуточные задачи и критически относится к собственным результатам, доводя их до состояния, близкого к идеальному.

Заключение. Диссертационная работа Валова Александра Викторовича представляет собой законченное научное исследование, в котором решена актуальная задача разработки математических моделей и вычислительно эффективных методов описания гидравлических и интерфейсных трещин в слоистых поропругих средах. Работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения искомой степени по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что диссертационная работа Валова А.В. удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Головин Сергей Валерьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Научный руководитель

д.ф.-м.н., проф. РАН, заведующий лабораторией
цифровых и интеллектуальных систем добычи
углеводородов Института гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН


21.09.2026

Головин С.В.

Почтовый адрес:

630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева 15,

тел. 8-383-3331612

e-mail: golovin@hydro.nsc.ru

Подпись Головина С.В. заверяю

Ученый секретарь института гидродинамики

им. М.А. Лаврентьева СО РАН

к.ф.-м.н.



19.2026.

Ермишина В.Е.