

Отзыв

официального оппонента д.ф.-м.н. Осипцова Андрея Александровича
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

Диссертация посвящена построению иерархии моделей трещин, распространение которых поддерживается давлением движущейся в них вязкой жидкости, и ее применению для исследования таких трещин. Наиболее очевидным, но не единственным приложением предлагаемых в диссертации моделей является технология гидроразрыва пласта, широко используемая для интенсификации добычи углеводородов. Технология заключается в создании высоко проводящих трещин в нефте- и газосодержащем коллекторе именно путем закачки в них вязкой жидкости, и ее эффективность существенно зависит от качества моделей, используемых при разработке дизайна всей процедуры. В последние несколько лет в силу необходимости развития отечественных технологий гидроразрыва пласта, в том числе для стимуляции добычи на скважинах в нетрадиционных коллекторах, возрос интерес к разработке отечественных моделей трещин, что подчеркивает актуальность выбранной в диссертации темы.

Научная новизна результатов и сделанных выводов

Основными положениями диссертации, обладающими научной новизной являются следующие.

1. Представленная в первой главе диссертации трехмерная модель начального этапа трещины гидроразрыва пласта, способная описывать распространение трещины в породе, анизотропность и неоднородность напряженного состояния которой определяется наличием нагруженной давлением скважины и неодинаковым сжатием породы на удаленной границе.
2. Описанный в первой главе вычислительный алгоритм решения полной связанной задачи развития трещины, нагруженной давлением вязкой жидкости, в рамках предложенной полной трехмерной модели. Сложность связанной задачи вызвана необходимостью решения системы

нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в области с двумя движущимися границами.

3. Предложенный во второй главе метод описания распространения трещины, в котором направление продвижения трещины определяется путем выбора сразу всей формы фронта, удовлетворяющей заданному критерию. Это позволяет учитывать сложное напряженное состояние в окрестности фронта трещины и описывать как гладкие траектории трещины, так и их изломы.
4. Разработанная в третьей главе диссертации численная модель движения жидкости, пригодная для расчета параметров двумерных течений в трещине жидкостей различных реологий: ньютоновской, неньютоновской в приближении Гершеля-Балкли и слабосжимаемой на основе одного численного алгоритма.
5. Новый программный комплекс для решения задачи распространения трещины сложной формы при закачке в нее вязкой жидкости. Обоснование применимости комплекса при решении задач с учетом практически важных особенностей и эффектов, сопровождающих распространение трещин гидроразрыва, таких как излом траектории и пережатие.
6. Результаты исследования формирования поверхности трещины на начальном этапе ее распространения и полученные в процессе исследования количественные оценки уменьшения раскрытия трещины в окрестности скважины.
7. Сформулированные автором на основе результатов численного моделирования и безразмерного анализа условия применимости ньютоновской модели жидкости для описания ее движения в трещине и модели трещины с разнесенными в пространстве фронтами жидкости и трещины.

Практическая значимость результатов диссертации

Полученные результаты в виде иерархии математических моделей, вычислительных алгоритмов и программного комплекса имеют практическое приложение в области нефтегазовой геофизики, в частности, могут быть применены для анализа развития трещин гидроразрыва нефтеносных пластов и повышения эффективности этой процедуры. Результаты диссертационной работы использовались в технологической компании, занимающейся интенсификацией нефтедобычи, что также говорит об их практической значимости.

Достоверность и обоснованность полученных результатов,

Достоверность результатов исследования обеспечивается получением их на основе современного математического аппарата и обоснованных способов построения математических моделей в рамках современных представлений о механизмах эволюции трещин, деформации упругого твердого тела и движении жидкости. Достоверность численных моделей проверялась путем сравнения полученных с их использованием результатов с аналитическими решениями, экспериментальными данными и расчетами других авторов.

Замечания по диссертационной работе

Глава 1:

- В иерархии моделей отсутствуют ветвящиеся трещины, которые характерны для распространения трещины ГРП в коллекторе с естественной трещинноватостью, в том числе в сланцах;
- пренебрежение пропантом – избыточное предположение. При инициации трещины происходит закачка чистой жидкости (также называемая в индустрии “подушкой” или “pad”);
- как рассчитывается лаг вблизи кончика трещины? Как лаг зависит от времени?

Глава 2:

- почему не учтены коэффициент Био и модуль Био? Даже если нет дренажа, они должны войти в выражения для упругих коэффициентов;
- почему не учтены утечки жидкости из трещины во вмещающую породу?

Глава 4:

- зачем учитывать предел текучести $\{\tau_0\}$ если инициация трещины в принципе не производится кросслинкованным гелем, а используется линейный гель без предела текучести?
- Рисунок 4.37. Кривизна стенок трещины может вызывать значительные возмущения напряженного состояния и, как следствие, разрушение породы. Эту возможность легко оценить, но это не сделано в работе. Судя по рисункам 4.37 при повороте трещины на ее берегах должны возникать значительные сжимающие и растягивающие напряжения, которые могут привести к возникновению очагов упругопластического деформирования и выкрашиванию породы. Представляет интерес сравнить максимальные касательные напряжения с пределом прочности реальных горных пород;

- Также хотелось бы поднять вопрос о необходимости очертить область применимости модели. Расчет 20 шагов по времени длится 4 часа на персональном компьютере. Как можно было бы обозначить практическую пользу от полученного решения, помимо несомненной фундаментальной значимости. В каких ситуациях расчет короткого интервала времени в 3D модели позволит судить о дальнейшей траектории и применить, например, планарные модели для дальнейшего расчета в найденном направлении?

Глава 5:

Раздел 5.3.

- С. 193, критерий закупоривания трещины проппантом. Автор диссертации предлагает рассматривать критерий закупорки трещины частицами проппанта лишь в виде предельной максимальной объемной концентрации частиц, в то время как феномен бриджинга (возникновения “мостика” из частиц поперек трещины) является существенно зависимым от локальной геометрии, а именно от соотношения размеров ширины трещины и диаметра частиц. В литературе (Gruesbeck&Collins 1982) был предложен полуэмпирический критерий бриджинга в виде $w^* = 2.5d$, где w^* это критически малая ширина трещины, при которой начинается закупоривание, а d это диаметр частиц проппанта. Впоследствии данный кинематический критерий был обобщен и был предложен динамический критерий бриджинга, учитывающий также силы взаимодействия между частицами и со стенками трещины, а также силы вязкого трения, действующие со стороны жидкости на остановившиеся частицы проппанта (Garagash, I. A., Osipov, A. A., & Boronin, S. A. (2019). Dynamic bridging of proppant particles in a hydraulic fracture. *International Journal of Engineering Science*, 135, 86-101.) Рассматриваемый в диссертации критерий остановки движения частиц при достижении значения объемной концентрации плотной упаковки скорее подходит для описания формирования осадка частиц, осаждающихся под действием гравитации на дно трещины, где действительно остановка их движения происходит при достижении плотной упаковки. Вообще говоря, в областях трещины, где на ширину приходится 2-3 зерна проппанта, приближение сплошной среды уже перестает быть применимо, и поэтому само использование концепции объемной доли частиц может быть некорректным, поэтому рекомендуется в качестве критерия использовать геометрический критерий бриджинга (кинематический или динамический).

- Формула (5.53) и далее. Использовано значение $C^*=0.74$ (решение задачи о регулярной гексагональной плотной упаковке сфер) для максимальной концентрации плотной упаковки одинаковых сферических частиц проппанта, в то

время как в реальности на практике это значение никогда не достигается. Максимальная концентрация случайной плотной упаковки сфер лежит в диапазоне 0.52-0.65 (различают random loose packing и random close packing, а именно упаковка при первичном соприкосновении частиц и плотная не улучшаемая упаковка под действием сжимающих напряжений от стенок трещины). В моделях транспорта проппанта, имплементированных в коммерческих симуляторах ГРИ транснациональных нефтесервисных компаний, как правило, принято значение $C^*=0.65$.

Заключительные выводы

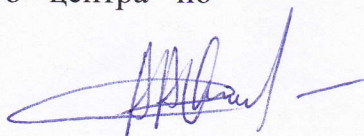
Диссертационная работа и автореферат Лапина В.Н. по содержанию и представленным результатам соответствуют паспорту специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Текст диссертации и автореферата логически выстроен и написан грамотным научным языком. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Анализ полученных теоретических и практических результатов позволяет считать, что диссертация Лапина В.Н. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема создания методов для описания широкого класса трещин. Приведенные в диссертации результаты достаточно полно в 18 публикациях соискателя.

Считаю, что 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. N 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».

Директор проектного центра по
энергопереходу

Осипцов Андрей Александрович

д.ф.-м.н.



1 марта 2023 г.

Автономная некоммерческая образовательная
организация высшего образования

«Сколковский институт науки и технологий»

Адрес: 121205, г. Москва, территория
инновационного центра «Сколково»,

Большой бульвар, д. 30 стр.1

Телефон: +7 (495) 280 14 81

E-mail: a.osiptsov@skoltech.ru

Подпись Осипцова Андрея Александровича удостоверяю

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
Гук О.С.

