

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» (ФИЦ ИВТ)

Диссертация «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» выполнена в лаборатории математического моделирования Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий».

В период подготовки диссертации соискатель Лапин Василий Николаевич работал в лаборатории математического моделирования Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» в должности научного сотрудника, с 2016 г. – в должности старшего научного сотрудника. С 2021 г. работает в лаборатории проблем тепломассопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в должности старшего научного сотрудника.

В 2000 г. окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета (в настоящее время Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по специальности «математика».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» защитил в 2006 году в диссертационном совете Д 003.046.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (в настоящее время Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»), диплом ДКН № 023305 от 13.04.2007.

Научный консультант — Черный Сергей Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем тепломассопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение

Актуальность темы исследования

Построение и обоснование наиболее полных трехмерных численных моделей распространения трещины от полости в упругой среде под действием давления закачиваемой в нее жидкости, включающих в себя математические модели и численные методы для их

реализации, является актуальной научной и прикладной задачей. Актуальность задачи построения модели трещины для механики трещин, обуславливающая научную значимость работы, заключается в необходимости установления механизмов влияния реологии закачиваемой в полость и трещину жидкости, обобщенного напряженного состояния среды, ее упругих свойств на эволюцию инициированной трещины, ее траекторию на ранней стадии распространения и раскрытие.

В области математического моделирования и численных методов построение новых наиболее полных трехмерных математических моделей механики трещин, их обоснование, разработка надежных, экономичных численных методов чрезвычайно актуальны в связи с необходимостью адекватного описания механики разрушения материала и связанными с этим огромными затратами вычислительных ресурсов.

Одним из очевидных приложений моделей, позволяющих рассчитывать распространение трещины одновременно с движением жидкости в ней, является описание распространения трещины гидроразрыва пласта. В гидроразрыве пласта под действием давления жидкости в области перфорации около скважины инициируется зародышевая трещина, в дальнейшем распространяющаяся в нетронутом массиве породы и заполняемая твердыми частицами, называемыми проппантом. После прекращения закачки смеси жидкости с проппантом и утечки жидкости через берега трещины в породу происходит закрепление трещины на проппанте. Закрепленная трещина становится высокопроводящим каналом для откачивания нефти или газа из несущего пласта.

В настоящее время все большее место в мире занимает разработка нетрадиционных месторождений, которые характеризуются более сложной структурой нефтеносных и объемом запасов в месторождении. Отличительными малым газоносных пластов, особенностями таких пластовых резервуаров являются низкая или наоборот экстремально разработка Очень часто таких нетралиционных проницаемость пласта. месторождений становится экономически невыгодной без такой интенсификации добычи, как гидроразрыв. В виду сложности физики и недоступности прямому наблюдению процесса развития трещины гидроразрыва пласта оценка технологических параметров при проведении гидроразрыва и геометрических размеров созданной трещины возможна только на основе математического моделирования. В то же время имеющиеся одномерные, плоские и псевдотрехмерные модели гидроразрыва в случае нетрадиционных месторождений не позволяют адекватно описывать процессы, проходящие в окрестности скважины, и требуются новые более сложные, трехмерные модели.

Технологическая разработка нетрадиционных пластовых резервуаров сопровождается проектированием новых жидкостей гидроразрыва и различных добавок к ним, которые значительно изменяют реологическое поведение этих жидкостей. Реология большинства таких жидкостей может быть описана на основе модели Гершеля-Балкли. Реологический закон Гершеля-Балкли является наиболее общим и содержит в себе более простые реологические модели как его частные случаи: ньютоновскую, степенную, Бингама-Шведова. Для исследования влияния реологии жидкости на поведение процесса гидроразрыва пласта в диссертационной работе разработанные ранее автором модели совершенствуются путем замещения в них ньютоновской модели жидкости моделью Гершеля-Балкли.

Современные подходы к разработке нетрадиционных пластовых резервуаров предполагают создание скважин с криволинейной траекторией, которая не позволяет гарантированно ориентировать зародышевую трещину ГРП в плоскости, ортогональной направлению действия минимальных напряжений в пласте. Это приводит к искривлению трещины при ее распространении и переориентации, что в свою очередь вызывает уменьшение раскрытия трещины на искривленном участке – пережатие, которое приводит к повышению давления в окрестности скважины и может вызвать закупоривание трещины проппантом при его закачке. Исследование эффекта пережатия трещины на основе вычислительного

эксперимента позволяет выбрать интервалы изменения параметров, позволяющие избежать его возникновения.

Задача построения критерия распространения трещин в анизотропном поле напряжений, способном описывать их негладкую или сильно искривленную поверхность трещины, остается до настоящего момента нерешенной. Этим обосновывается актуальность приведенных в диссертационной работе исследований, посвященных разработке критерия направления распространения трещины и его обоснованию на основе экспериментальных данных.

Цели работы

Основными целями диссертационной работы являются следующие

- 1. Разработка иерархии трехмерных и одномерных численных моделей распространения трещин в упругой хрупкой среде под действием закачиваемой жидкости сложной реологии.
- 2. Применение входящих в иерархию моделей для исследования особенностей распространения трещин действием закачиваемой жидкости и решения практически значимых задач

Степень достоверности результатов

Степень достоверности результатов проведенных соискателем исследований, определяется использованием в качестве основы моделирования фундаментальных законов механики твердого тела, механики разрушения, механики жидкости и выбором теоретически обоснованных и практически верифицированных численных методов. Достоверность обеспечивается хорошим согласованием результатов вычислительных экспериментов с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и расчетами других исследователей.

Новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

- 1. Отличительными особенностями новой разработанной модели являются ее полная трехмерность и одновременное рассмотрение в ней скважины с трещиной, нагруженных непостоянным давлением от течения жидкости в них.
- 2. Впервые лично 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. На основе предложенного **нового неявного критерия** выбора направления и величины приращения трещины сложной геометрии впервые строится положение всего фронта трещины с учетом всех трех мод КИН. Это позволяет описывать распространение трещины при сложном нагружении, даже если траектория распространения не является гладкой кривой.
- 4. **Впервые** в рамках трехмерной постановки численно описан эффект пережатия трещины, вызванный искривлением ее поверхности, показано влияние на него внешних факторов, определены области применимости моделей, использующихся для его описания.

Практическая значимость

Практическая диссертационной работы заключается в возможности применения 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. В частности, разработанный инструментарий может быть применен для описания начального этапа распространения трещины и оценки влияния искривления трещины на весь процесс ГРП. На основе проведенных исследований выявлена область применимости моделей для описания движения жидкостей сложной реологии в распространяющихся трещинах.

Положения, выносимые на защиту

- 1. Трехмерная математическая модель распространения существенно трехмерной, криволинейной трещины, описывающая одновременно движение жидкости в трещине на основе новой модели жидкости сложной реологии, деформацию породы и ее разрушение на основе нового неявного глобального критерия выбора направления распространения трещины, учитывающего все три моды коэффициентов интенсивности напряжений (соответствует пункту 1. «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.» паспорта специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»)
- 2. Метод решения связанной системы нелинейных уравнений трехмерной модели распространения трещины под действием закачиваемой в нее вязкой жидкости. (соответствует пункту 3. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.» паспорта специальности 1.2.2)
- 3. Программный комплекс для решения задач распространения трещины от полости в упругой среде и по границе между материалами при закачке в них вязкой жидкости. (соответствует пункту 4. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» паспорта специальности 1.2.2)
- 4. Результаты решения практических задач на основе математического моделирования (соответствует пункту 5. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.» паспорта специальности 1.2.2)
 - а. на основе моделирования криволинейного распространения трещины от скважины в породу под действием давления закачиваемой в нее вязкой жидкости описан эффект пережатия трещины и определены влияющие на него параметры
 - b. определены границы применимости модели ньютоновской жидкости для описания течения жидкости сложной реологии внутри криволинейной трещины гидроразрыва
 - с. установлены зависимости стойкости гидроизоляции скважин от параметров используемого цемента и условий его застывания, размеров возможных дефектов, порового давления.

Личное участие соискателя ученой степени

Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно. Результаты, выносимые на защиту, принадлежат лично соискателю. Во всех совместных работах автор участвовал в формулировках постановок задач, разрабатывал и реализовывал математические модели и критерии.

Краткая характеристика научных работ соискателя

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:

- 1. Лапин В.Н. Модель распространения трещины вдоль гидроизоляции скважины // Вестник НГУ. Серия: Инф. тех. 2020. Т.18. № 1. С.36-49.
 - В работе разработана математическая модель трещины, распространяющейся по границе материалов, проведена ее валидация. На основе разработанной модели решена задача о стойкости гидроизоляции скважины, определены параметры, влияющие на распространение трещины обсадной колонной скважины и цементной пробкой внутри нее.
- 2. Lapin V.N., Esipov D.V. Simulation of proppant transport and fracture plugging in the framework of a radial hydraulic fracturing model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2020. Vol. 35, No 6. P. 325-339 (Scopus)
 - Реализована плоская модель радиальной трещины с учетом переноса проппанта и остановки его движения, исследованы условия, приводящие к образованию проппантной пробки в различных частях трещины. Соискателю принадлежит реализация уравнений модели и асимптотических граничных условий.
- 3. Лапин В.Н., Фомина А.А. Валидация неявного критерия выбора направления распространения трещины при смешанной нагрузке // Сибирский журнал индустриальной математики. 2019. Т. 22 №4. С. 33-43. (Scopus)
 - Проведена валидация и верификация глобального неявного критерия для выбора направления распространения трещины на двух сериях экспериментов. Соискателю принадлежит формулировка неявного критерия, численный алгоритм его реализации, постановки задач. Соавтором (студентом НГУ) под научным руководством соискателя проведены численные расчеты и выполнено представление результатов.
- 4. Лапин В.Н. Модель потерь бурового раствора в систему трещин в задаче определения параметров трещиновато-пористой среды // Выч. технологии. 2019. Т. 24 №4. С. 38-55
 - Разработана модель распространения плоской круговой трещины вдоль существующей естественной трещины под действием закачки бурового раствора. Разработан метод решения задачи определения количества и ширины естественных трещин по данным о потерях бурового раствора.
- 5. Cherny S., Lapin V., Kuranakov D., Alekseenko O. 3D model of transversal fracture propagation from a cavity caused by Herschel-Bulkley fluid injection // Int. J. of Frac. 2018. Vol. 212, No. 1. P. 15-40. (Wos, Scopus)
 - Модель трехмерной трещины гидроразрыва пласта обобщена на случай задачки жидкости сложной реологии. На основе безразмерного анализа установлены границы применимости модели ньютоновской жидкости для описания течения жидкости сложной реологии в распространяющейся трещине. Соискателю принадлежит модель движения жидкости сложной реологии в трещине, численный метод ее реализации, исследования на основе безразмерного анализа.
- 6. Карнаков П.В., Куранаков Д.С., Лапин В.Н., Черный С.Г., Есипов Д.В. Особенности распространения трещины гидроразрыва породы при закачке в нее смеси проппанта и жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 3. С. 611-628.
 - Предложена численная модель длинной трещины гидроразрыва пласта, описывающая процессы течения в ней смеси жидкости и проппанта, распространения трещины с переменным по высоте и длине ее открытием, оседания проппанта и образования проппантовой упаковки, фильтрации жидкости через эту упаковку. Соискателю

принадлежит постановка задачи, формулировка уравнений модели и критерий образования проппантной пробки.

8. Cherny S., Lapin V., Esipov D., Kuranakov D., Avdyushenko A., Lyutov A., Karnakov P. Simulating fully 3D non-planar evolution of hydraulic fractures // Int. J. of Frac. – 2016 – Vol. 201, No. 2 – P. 181-211. (Wos, Scopus)

Предложена трехмерная модель распространения трещины, одновременно учитывающей деформацию породы вблизи трещины и полости, течения жидкости внутри трещины и ее распространение на основе критерия распространения. Соискателю принадлежит формулировка и реализация неявного критерия распространения трещины, верификация трехмерной модели.

9. Kuranakov D.S., Esipov D.V., Lapin V.N., Cherny S.G. Modification of the boundary element method for computation of three dimensional fields of strain-stress state of cavities with cracks // Eng. Fract. Mech. – 2016. – Vol. 153. – P. 302-318. (Wos, Scopus)

Трехмерная модель распространения трещины модифицирована путем использования дуального метода граничных элементов для решения задачи деформации породы. На основе модифицированной модели описано распространение продольной трещины и поперечной трещины, показано влияние параметров жидкости на форму трещины. Соискателю принадлежит постановка задач, алгоритм совместного решения уравнений модели и критерий распространения.

10. Есипов Д.В., Куранаков Д.С., Лапин В.Н., Черный С.Г. Математические модели гидроразрыва пласта // Выч. техн. – 2014. – Т. 19 №2. – С. 33-61

Проведен обзор математических моделей процесса гидроразрыва пласта. Рассмотрены наиболее широко используемые одно-, двух- и трехмерные модели. Представлен обзор преимуществ и недостатков модельных подходов, рассмотрены основные результаты, полученные при использовании представленных моделей. Соискателю принадлежит анализ постановок задач моделей и объединение их в иерархическую структуру

11. Карнаков П.В., Лапин В.Н., Черный С.Г. Модель гидроразрыва пласта, включающая механизм закупоривания трещины пропантом // Вестник НГУ. Серия: Инф. тех. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 19–33.

Разработана одномерная модель гидроразрыва пласта с учетом примеси пропанта в односкоростном приближении. Благодаря механизму учета фильтрации удалось описать уменьшение концентрации пропанта в пробке за счет жидкости вблизи пробки. Изучено влияние расписания закачки на длину трещины. Соискателю принадлежит постановка задачи, формулировка уравнений модели и критерий образования проппантной пробки.

12. Cherny S., Chirkov D., Lapin V., etc. Two dimensional modeling of the near-wellbore fracture tortuosity effect // Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. – 2009. – Vol. 46, No. 6. – P. 992-1000. (WoS, Scopus)

Предложена двумерная (2D) модель для гидравлического разрыва, распространяющегося вдоль некоторой заданной криволинейной траектории. На основе результатов вычислительного эксперимента описаны условия возникновения пережатия криволинейной трещины в окрестности скважины. Соискателю принадлежит описание эффекта пережатия криволинейной трещины и анализ условий его проявления.

По материалам диссертации также опубликованы одна монография

1. Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В., Куранаков Д.С. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 312с.

1. Lapin V. Implementation of planar 3D hydraulic fracture model in rock with layered compressive stress // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 2099. - P. 1-10. (Scopus)

Реализована и верифицирована плоская трехмерная модель трещины гидроразрыва. Показана возможность ее использования для описания распространения трещины в материале, нагруженном неоднородными сдвиговыми напряжениями.

2. Lapin V.N., Cherny S.G. An implicit criterion of fracture growth direction for 3D simulation of hydraulic fracture propagation // Procedia Structural Integrity. - 2018. - Vol. 11. - P. 1-6. (WoS, Scopus)

Предложен неявный глобальный критерий распространения трещины при сложном трехмерном нагружении, характеризующемся наличием трех мод коэффициентов интенсивности напряжений. Полная трехмерная модель трещины гидроразрыва модифицирована путем добавления неявного критерия выбора направления трещины. Соискателю принадлежит формулировка и реализация неявного критерия распространения трещины, верификация трехмерной модели.

3. Shokin Yu.I., Cherny S.G., Lapin V.N., Esipov D.V., Kuranakov D.S., Astrakova A.S. Methods for optimal control of hydraulic fracturing process // CEUR Workshop Proceedings. - 2017. - Vol.1839. - P. 423-444. (Scopus)

Предложены методы оптимального управления процессом гидроразрыва пласта в рамках модели радиальной трещины, распространяющейся под действием закачки жидкости Гершеля-Балкли. Соискателю принадлежит предложенная радиальная модель трещины и ее численная реализация.

- 4. Cherny S.G., Lapin V.N. 3D model of hydraulic fracture with Herschel-Bulkley compressible fluid pumping // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2. P. 2479-2486. (WoS, Scopus) Предложены модели движения жидкости сложной реологии и слабосжимаемой жидкости в трещине гидроразрыва. Численно показана возможность использования модели ньютоновской жидкости на начальном этапе распространения. Соискателю принадлежат модели движения жидкостей в трещине, численные методы их реализации, анализ численных результатов, определивший область применимости упрощенной модели.
- 5. Shokin Yu., Cherny S., Esipov D., Lapin V., Lyutov A., Kuranakov D. Three-dimensional model of fracture propagation from the cavity caused by quasi-static load or viscous fluid pumping // Communications in Computer and Information Science. Springer Science + Business Media, 2015. P. 143-157. (Scopus)

Предложена концепция и проведена верификация трехмерной неплоской модели распространения трещины в упругой среде под действием закачки жидкости и численный алгоритм ее реализации. Соискателю принадлежит численный метод совместного решения уравнений модели и его верификация.

6. Cherny S.G., Lapin V.N., Chirkov D.V., Alekseenko O.P, Medvedev O.O. 2D Modeling of Hydraulic Fracture Initiating at a Wellbore with or without Microannulus // Materials of SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas. - 2009. - P. 1-23 (Scopus).

Предложена двумерная модель гидравлического разрыва, распространяющегося по заданной криволинейной траектории. Численно показано, что искривление траектории наряду с анизотропностью напряженного состояния материала приводит к пережатию трещины на искривленном участке. Соискателю принадлежит численное описание эффекта пережатия и установление влияющих на него факторов.

Учитывая вышеизложенное, постановили

Диссертация «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» Лапина Василия Николаевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на заседании № 1517 объединенного семинара «Информационновычислительные технологии» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», Кафедры математического моделирования НГУ, Кафедры вычислительных технологий НГТУ.

На заседании присутствовали: академик Шокин Ю.И., д.т.н. Барахнин В.Б., д.ф.-м.н. Воропаева О.Ф., д.ф.-м.н. Горобчук А.Г., д.ф.-м.н. Ковеня В.М., д.т.н. Лепихин А.М., д.ф.-м.н. Мартюшов С.Н., д.ф.-м.н. Медведев С.Б., д.ф.-м.н. Мороков Ю.Н., д.т.н. Москвичев В.В., д.ф.-м.н. Суторихин И.А., д.ф.-м.н. Хакимзянов Г.С., д.ф.-м.н. Черный С.Г., д.ф.-м.н. Черных Г.Г., д.ф.-м.н. Чубаров Л.Б., к.ф.-м.н. Банников Д.В., к.т.н. Буров А.Е., к.ф.-м.н. Гусев О.И., к.ф.-м.н. Киланова Н.В., к.филол.н. Кожемякина О.Ю., к.ф.-м.н. Лебедев А.С., к.ф.-м.н. Молородов Ю.И., к.ф.-м.н. Паасонен В.И., к.ф.-м.н. Семисалов Б.В., к.ф.-м.н. Стогниенко В.С., к.ф.-м.н. Талышев А.А., к.ф.-м.н. Турчановский И.Ю. и др.

Всего присутствовало на заседании 42 человека, из них 15 докторов наук и 12 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» — 42 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол № 5/22 от 12 апреля 2022 года.

Секретарь семинара:

Гусев Олег Игоревич кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории анализа и оптимизации нелинейных систем ФИЦ ИВТ