

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования “Сколковский институт науки и технологий”

Шевцова Анна Александровна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА
ГОРНЫХ ПОРОД, ИНИЦИИРОВАННОЙ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТЕЙ
С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель к.т.н., профессор Алексей Николаевич Черемисин

Москва – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее эффективных методов как для стимулирования добычи углеводородов из низкопроницаемых продуктивных пластов нетрадиционных коллекторов, так и для интенсификации продуктивности скважин на завершающих стадиях разработки. Кроме того, в последние годы геотермальные энергетические ресурсы приобретают всё большие перспективы развития благодаря огромному потенциалу и экологичности. Горячая сухая порода (Hot Dry Rock), представляющая собой плотный и низкопроницаемый горный массив, требует применения метода гидравлического разрыва для создания системы разветвленных и взаимосвязанных трещин с целью последующего увеличения площади теплообмена, которая известна как усовершенствованная геотермальная система (Enhanced Geothermal System). Кроме того, технология гидроразрыва используется в горном деле для снижения опасных напряжений в массиве вокруг горных выработок при добыче угля и является основным методом измерения напряжений в пласте в проектах, связанных с добычей полезных ископаемых. В дополнение к уже описанным областям применения, эта технология используется для разработки метана в угольных пластах и для захоронения отходов.

Однако, в последнее десятилетие было отмечено, что доступные и широко применяемые жидкости гидроразрыва на водной основе оказывают существенное негативное воздействие на свойства пород коллектора (а также на эффективность операций гидроразрыва) и вызывают набухание глинистой компоненты, блокируют поровое пространство, формируют устойчивые эмульсии с пластовыми жидкостями, что привело к тенденции совершенствования технических характеристик существующих жидкостей для инициации трещин гидроразрыва и разработке новых. К тому же, описанные ранее теоретические модели распространения трещины гидроразрыва имеют некоторые ограничения в прогнозировании влияния жидкостей на свойства пород резервуара, а прямые измерения параметров трещины гидроразрыва в пластовых условиях весьма затруднительны.

Не стоит забывать, что апробация и усовершенствование технологии гидроразрыва в пластовых условиях (in-situ), в целевом резервуаре является достаточно сложной и дорогостоящей процедурой. В то же время, в лабораторных условиях инициация трещин гидроразрыва на образцах, отобранных из целевого резервуара, позволяет подобрать оптимальную жидкость гидроразрыва и условия ее закачки, произвести прямые измерения раскрытия трещины, проанализировать топографию поверхности (стенки) трещины гидроразрыва, что в совокупности со степенью раскрытия трещины, может существенно влиять на подбор проппанта для его успешной доставки в созданную сеть трещин и последующего закрепления трещин в открытом состоянии. Таким образом, лабораторные эксперименты можно рассматривать как разумную альтернативу для тестирования новых жидкостей и новых методов, поскольку они могут предоставить исчерпывающую информацию о результирующих параметрах созданной трещины (эффективное давление гидроразрыва, раскрытие трещины, скорость роста трещины) перед внедрением новой технологии гидроразрыва пласта в полевых условиях, что определяет актуальность темы исследования.

Данная работа посвящена экспериментальному выявлению зависимостей между параметрами трещины гидроразрыва и вязкостью жидкости, инициирующей трещину, в условиях псевдо-трехосного и истинно трехосного нагружения.

Экспериментальные данные, использованные для написания данной диссертации, были получены автором в рамках программы развития исследовательского центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты» в соответствии с соглашением № 075-10-2020-119 и соглашением № 075-10-2022-011.

Целью данного исследования является установление взаимосвязей между параметрами трещины гидроразрыва и вязкостью жидкости, инициирующей трещину в низкопроницаемых горных породах, для последующего выбора жидкости в зависимости от свойств пород и конкретных технологических задач.

Идея работы заключается в исследовании параметров трещин гидроразрыва в образцах горных пород с помощью высокоточных многоканальных акустоэмиссионных и механических измерений в процессе закачки модельных и применяемых в полевых операциях жидкостей с диапазоном вязкостей от 0.1 сП до 100 000 сП.

Для достижения заявленной цели были сформулированы и выполнены следующие **задачи**:

1. Разработка специальной методики проведения лабораторных экспериментов гидроразрыва в цилиндрических образцах горной породы (10 см×10 см) и в кубических образцах горной породы (25 см×25 см) с обеспечением непрерывного мониторинга параметров роста трещины гидроразрыва тремя независимыми системами наблюдения: датчиками акустической эмиссии и ультразвукового прозвучивания; датчиками осевой и радиальной деформации образца горной породы и датчиками давления и объема жидкости гидроразрыва в псевдо-трехосных и истинно трехосных условиях нагружения.

2. Установление взаимосвязи параметров трещины гидроразрыва и динамики её распространения с вязкостью, инициирующей трещину жидкости, в псевдо-трехосных условиях нагружения.

3. Установление взаимосвязи характеристик поверхности трещины гидроразрыва (извилистости, шероховатости) с вязкостью, инициирующей трещину жидкости.

4. Установление взаимосвязи параметров трещины гидроразрыва и динамики её распространения с вязкостью, инициирующей трещину жидкости, в истинно трехосных условиях.

Основные научные положения и их новизна:

1. Показано, что прямые и независимые измерения ключевых параметров трещины гидроразрыва и комплексный анализ динамики её распространения в образцах горных пород возможно осуществлять в лабораторных условиях, соответствующих условиям естественного залегания, на основе разработанной специальной методики физического моделирования инициации и распространения трещины с непрерывным мониторингом независимыми друг от друга датчиками деформаций образца, датчиками давления и объема жидкости гидроразрыва, высокочувствительными пьезоэлектрическими датчиками акустической эмиссии (АЭ) оригинальной конструкции, способными работать при всестороннем давлении до 140 МПа и температуре до 180°C при частоте дискретизации 10 МГц, что по локализации АЭ-событий обеспечивает точность определения формы трещины около 5 мм.

2. Увеличение вязкости жидкости, инициирующей трещину гидроразрыва, способствует уменьшению извилистости стенок трещины, что совместно с бóльшим

раскрытием является наиболее благоприятным для эффективной доставки и распределения проппанта, обеспечивающего долгосрочное раскрытие трещины гидроразрыва в горных породах.

3. При псевдо-трехосном нагружении цилиндрических образцов (10 см × 10 см) и истинно трехосном нагружении кубических образцов (25 см × 25 см × 25 см) возрастание вязкости закачиваемой жидкости приводит к увеличению раскрытия трещины, увеличению эффективного давления гидроразрыва и уменьшению скорости роста трещины, что может быть использовано для экспериментальной проверки моделей, описывающих трещины гидроразрыва, а также при проектировании гидроразрыва горных пород в условиях естественного залегания.

Обоснованность и достоверность выдвинутых положений и выводов обеспечена:

- применением проверенных современных методик экспериментальных исследований;
- воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных данных общим законам физики, теории прочности и акустики, а также ранее опубликованным результатам;
- представительным количеством выполненных экспериментов, полученных с использованием разработанной экспериментальной методики;
- удовлетворительным совпадением результатов обработки и интерпретации геомеханических данных, описывающих параметры трещины гидроразрыва, с результатами регистрации сигналов акустической эмиссии;
- апробацией результатов на международных конференциях.

Методы исследований включали анализ и обобщение литературных источников, лабораторное экспериментальное моделирование гидроразрыва на цилиндрических и кубических образцах горных пород с определением ключевых параметров (эффективное давление гидроразрыва, раскрытие трещины, скорость роста трещины) и динамики развития трещин по локации акустико-эмиссионных событий, обработку, интерпретацию и анализ полученных данных.

Научное значение работы состоит в установлении полученных впервые взаимосвязей между параметрами трещины гидроразрыва и вязкостью жидкости, инициирующей эту трещину, для исследованных горных пород на разных масштабных уровнях в псевдо-трёхосных и истинно трехосных условиях при использовании жидкостей в широком диапазоне вязкостей от 0.1 сП до 100 000 сП.

Практическая значимость и реализация результатов исследования состоит в разработке методических рекомендаций по оптимизации операций гидроразрыва пласта на основе полученных в лабораторных условиях результатов экспериментов по инициации трещины гидроразрыва на образцах горных пород.

Апробация работы. Основные тезисы и результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и научно-практических семинарах: (1) SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, October **2018**; (2) EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May **2020**; (3) Ist International Scientific and Practical Conference «Modern Methods of Enhanced Oil Recovery for Conventional and Unconventional Reservoirs. November 29th – December 1st, 2021. Moscow, Russia.

Публикации. По теме диссертации опубликовано: 1 статья в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 статьи в изданиях WoS квартиля Q2 по SJR и 3 тезиса, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, изложенных на 178 страницах машинописного текста, включает 116 рисунков, 28 таблиц, список источников из 185 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность к.ф.-м.н. Станцицу С.А. (Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта) за содержательные консультации и поддержку, а также бесценную помощь в реализации данного исследования. Также автор хотел бы поблагодарить за ценные рекомендации своего научного руководителя профессора Сколковского института науки и технологий к.т.н. Черемисина А.Н., директора центра науки и технологий добычи углеводородов Сколтеха к.х.н., проф. Спасенных М.Ю., д.т.н., проф. Магадову Л.А. (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина), к.т.н. Бородин С.А. (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина). Автор также благодарен своим коллегам: Стукачеву В.И., Эфстадиу В.А., Липатову Н.В., Бобровой М.А., Филеву Е.А. за возможность осуществления экспериментальной части исследования, а также сотрудникам Центра науки и технологий добычи углеводородов за помощь, оказанную при работе над диссертацией. Особую благодарность автор выражает своей семье за своевременную поддержку и помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** дается обзор актуальных научных публикаций о проблемах гидроразрыва пласта и существующих жидкостях для инициации трещин гидроразрыва, их альтернативах и разнообразии компонентов, разработанных за последние десятилетия для совершенствования технологий ГРП.

Анализ литературных источников, показал, что несмотря на широкое применение технологии гидроразрыва пласта, экспериментальные исследования для выявления особенностей роста трещины гидроразрыва в целевых породах коллектора и выявления зависимостей параметров трещины от реологических свойств закачиваемой жидкости все еще изучены недостаточно. Следует выделить отечественных ученых, публикации которых посвящены исследованиям трещины гидроразрыва: Станциц С.А., Турунтаев С.Б., Смирнов В.Б., Попов С.Н., Коврижных А.М., Курленя М.В., Леонтьев А.В., Сердюков С.В., Патутин А.В. и др., а также разработке жидкостей гидроразрыва: Силин М. А., Магадова Л.А., Бородин С.А. и др. Среди иностранных исследователей стоит выделить: Zoback M. D., Rummel F., Goodfellow S. D., Maxwell S. C., Suarez-Rivera, R., Ghassemi, A., Zhang J., Yang R. и др. Апробация и усовершенствование технологии гидроразрыва в пластовых условиях (in-situ), в целевом резервуаре является достаточно сложной и дорогостоящей процедурой. В то же время, в лабораторных условиях инициация трещин гидроразрыва на образцах, отобранных из целевого резервуара, позволяют подобрать оптимальную жидкость гидроразрыва и условия ее закачки, произвести прямые измерения раскрытия трещины, проанализировать поверхность трещины гидроразрыва, что в совокупности со степенью раскрытия трещины, может существенно влиять на подбор проппанта для его успешной доставки в созданную сеть трещин и последующего закрепления трещин в открытом состоянии. Поэтому такие исследования представляются перспективными, а выбранная тема работы – актуальной.

Вторая глава посвящена подробному описанию лабораторного оборудования (псевдо-трехосный пресс (MTS 815/S-ATM), истинно трехосный пресс), методологии проведения экспериментов и подробной характеристике испытываемых образцов и закачиваемых жидкостей гидроразрыва. Гранит был выбран в качестве модельного материала пород нетрадиционных коллекторов после выявления близости его прочностных и фильтрационно-емкостных свойств к аналогичным свойствам сланцев. Кроме того, гранит является целевой породой для геотермальных источников энергии.

В качестве агентов гидроразрыва использовались модельные и реальные жидкости на водной и безводной основе: жидкий CO₂, дистиллированная вода, линейный гель (ЛГ), минеральное масло Multitherm PG-1, жидкость на основе синтетического полимера Полигель, бесполимерная жидкость НЕФТЕНОЛ ВУПАВ, пенно-азотная система (ПАС) – вспененный сшитый гель, сшитые гели различной вязкости и состава – дизельные системы (ДС-1, ДС-2, ДС-3), силиконовые масла – полиметилсилоксановые жидкости различной вязкости (ПМС-1000, ПМС-10 000, ПМС-100 000). Диапазон вязкостей от 0.1 сП до 100 000 сП.

В **третьей главе** описаны основные результаты лабораторных экспериментов распространения трещины гидроразрыва в цилиндрических образцах магматических пород (Покостовский гранит, Ташмурунский гранит, трещиноватый Ташмурунский гранит) и дана подробная характеристика влияния реологии жидкости на параметры и динамику трещины. Для инициации трещины были использованы модельные и реальные агенты гидроразрыва на водной и безводной основе, вязкость которых различается в широком диапазоне (0.1 сП – 100 000 сП). Изменения давления жидкости гидроразрыва, удлинения образца, связанного с раскрытием трещины, объема закачиваемой жидкости, акустической эмиссии, излучаемой иницированной трещиной независимо регистрировались специальной трехкомпонентной системой мониторинга.

В **разделе 3.1** описаны 19 экспериментов гидроразрыва, выполненных на цилиндрических образцах Покостовского и Ташмурунского гранита. Особенности трещины гидроразрыва, иницированной закачкой маловязкой жидкости, выражены в низком давлении гидроразрыва, быстром распространении, незначительном раскрытии, более извилистой поверхности. В случае закачки высоковязкой жидкости гидравлическая трещина распространялась медленнее, деформометры регистрировали большее удлинение образца, что напрямую коррелирует с раскрытием трещины, а гидравлический разрыв происходил при большем давлении.

Рисунок 1 демонстрирует схему нагружения цилиндрических образцов (10см×10см), испытываемых в псевдо-трехосных условиях.

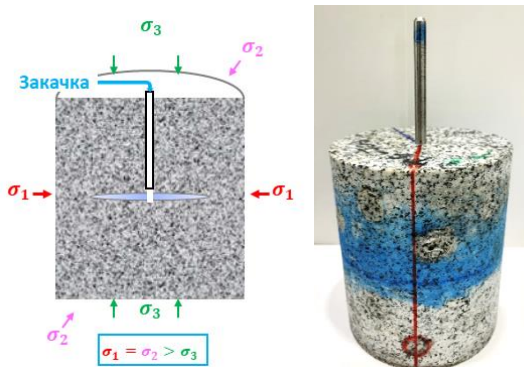


Рисунок 1. Схема нагружения образца во время эксперимента (слева) и фотография образца после эксперимента с закачкой подкрашенного агента гидроразрыва (справа).

Главное минимальное напряжение σ_3 было приложено вертикально, тем самым трещина раскрывалась перпендикулярно σ_3 . Ниже приведены графики, описывающие параметры трещины гидроразрыва, для цилиндрических образцов WG-707 с закачкой жидкого CO_2 (вязкость ~ 0.13 сП) и WG-708 с закачкой сшитого геля на основе дизельного топлива – дизельной системы 1 (ДС-1) (вязкость при 100 с^{-1} 710 сП) (Рисунок 2).

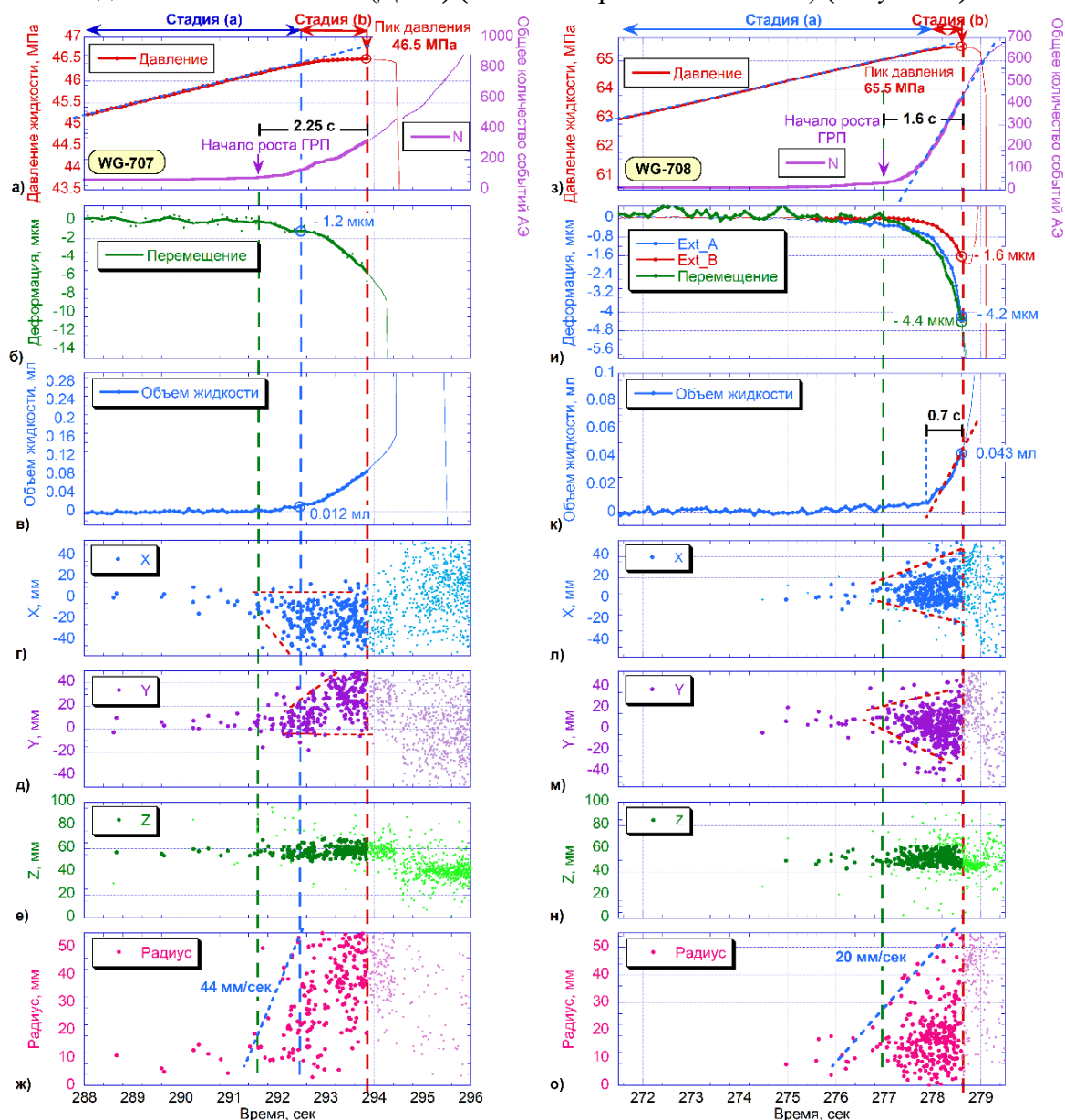


Рисунок 2. Параметры, зарегистрированные при закачке жидкого CO_2 , (WG-707, левая колонка) и сшитого геля ДС-1 (WG-708, правая колонка): (а),(з) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (б),(и) осевая деформация, измеренная левым (красный) и правым (синий) датчиками и кривой, описывающей перемещения поршня (зеленый); (в),(к) объем жидкости в трещине гидроразрыва; (г),(л) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлению X; (д),(м) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлению Y; (е),(н) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ; (ж),(о) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены от времени эксперимента.

Скорость закачки жидкости в экспериментах была постоянной и составляла 5 мл/мин. Для образцов было задано одинаковое напряженно-деформированное состояние

(НДС): $\sigma_1 = \sigma_2 = 37$ МПа; $\sigma_3 = 23$ МПа. Ключевым различием экспериментов являются реологические свойства закачиваемых жидкостей гидроразрыва. При закачке жидкого CO_2 наблюдается меньшее давление гидроразрыва (Рисунок 2а, красная кривая), меньшее раскрытие трещины (Рисунок 2б), меньший объем жидкости, заполнивший трещину (Рисунок 2в), и большая скорость распространения трещины гидроразрыва (Рисунок 2ж) по сравнению с соответствующими параметрами, представленными в правой колонке графиков, зарегистрированными при закачке более вязкого агента гидроразрыва – ДС-1.

Полученные результаты демонстрируют, что в лабораторных условиях возможно осуществить прямые измерения ключевых параметров трещины гидроразрыва и выполнить экспериментальную проверку моделей, описывающих трещины гидроразрыва, инициируемые закачкой различных жидкостей.

Рисунок 3 демонстрирует три ортогональные проекции положения заложившихся сигналов акустической эмиссии (АЭ) во времени, соответствующие трем стадиям развития трещины гидроразрыва. Первые три проекции, расположенные по вертикали, относятся к начальной стадии инициации и роста трещины гидроразрыва. Начальная стадия распространения трещины, инициированной закачкой маловязкого агента – жидкого CO_2 , происходит в довольно узком секторе, ориентированном в северо-восточном направлении. Трещина, инициированная закачкой более вязкого сшитого геля ДС-1, имеет практически радиальную форму распространения (Рисунок 3, правый). Даная асимметрия роста трещины гидроразрыва в образце WG-707 также хорошо продемонстрирована на графиках г-ж (Рисунок 2).

Следующая стадия эксперимента, окончание которой соответствует моменту достижения трещиной гидроразрыва цилиндрической поверхности образца, демонстрирует сохранение тенденции однонаправленного (в пределах узкого сектора) распространения трещины в образце WG-707. Сектор роста трещины расширился, но сохранил направление. В образце WG-708 форма трещины сохранила радиальную форму, но сместилась от центра в северо-восточном направлении. Это смещение подтверждается независимыми измерениями осевой деформации, зафиксированными экстензометрами: Ext_A (синий), установленный в направлении роста трещины, зафиксировал значительное удлинение образца, связанное с раскрытием трещины, равное 4,2 мкм. Ext_B (красный) зарегистрировал удлинение образца на 1,6 мкм.

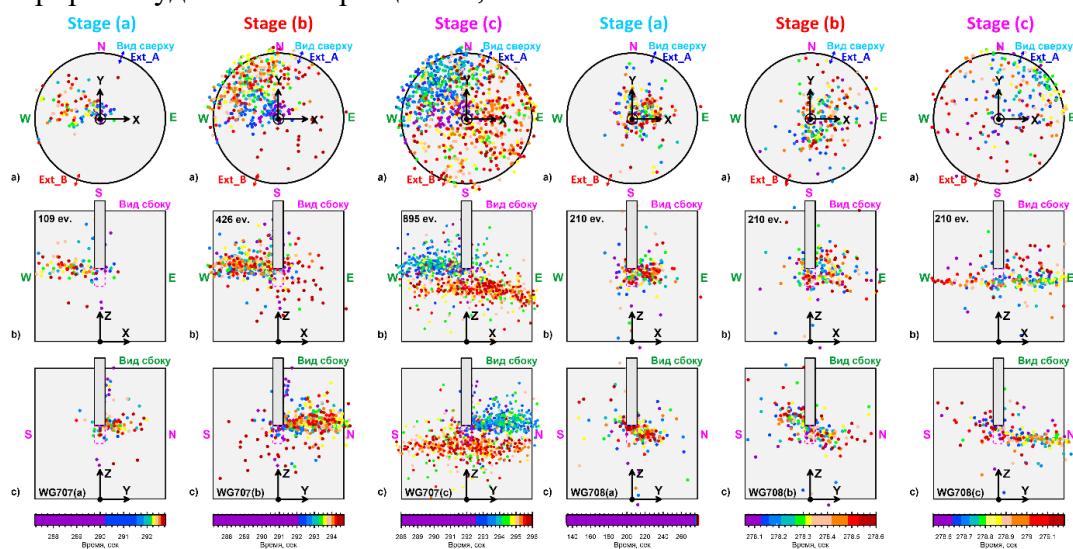


Рисунок 3. Три ортогональные проекции положений сигналов АЭ в пространстве образцов WG-707 (слева) и WG-708 (справа).

И последний набор проекций (по вертикали) относится к стадии закрытия трещины гидроразрыва, на котором сигналы АЭ для двух образцов были уже зарегистрированы по всей площади поперечного сечения образца.

Полученные локализации событий АЭ для двух образцов хорошо сопоставимы с фактическими положениями трещин гидроразрыва (Рисунок 4).

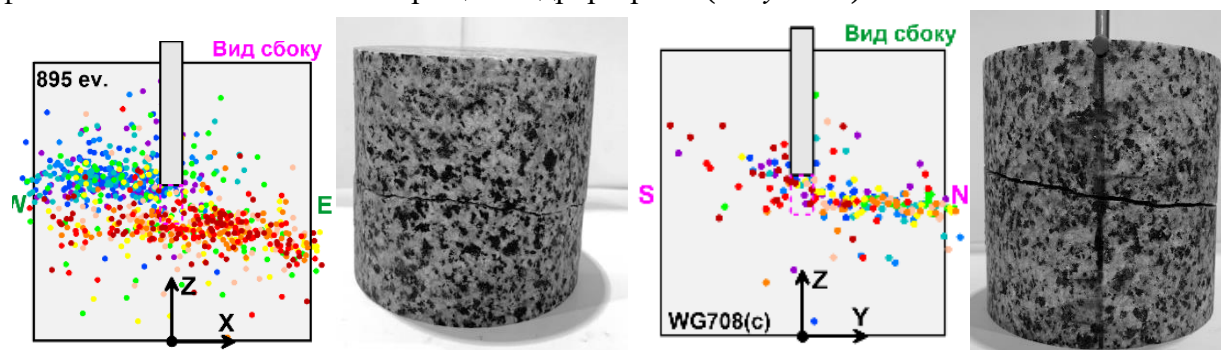


Рисунок 4. Фотографии образцов после экспериментов с горизонтальной трещиной WG-707 (слева) и WG-708 (справа).

В разделе 3.2 представлены результаты экспериментов гидроразрыва и анализ параметров трещины, инициированной в цилиндрических образцах трещиноватого Ташмурунского гранита. Существующие исследования показали, что распространение трещины гидроразрыва в естественно трещиноватой среде является довольно сложным процессом и даже незначительная трещиноватость влияет на эффективность операций гидроразрыва. Чтобы повысить эффективность полевых работ, необходимо понять, как созданные в процессе ГРП трещины взаимодействуют с естественными трещинами, и подобрать оптимальные условия закачки жидкости.

Образцы TG-714h и TG-715h были нагреты со скоростью изменения температуры – 2,72°C/мин до 800°C и выдержаны на максимальной температуре три часа с для создания сети межзерновых трещин. Рисунок 5 демонстрирует фотографии гранита до и после нагрева.

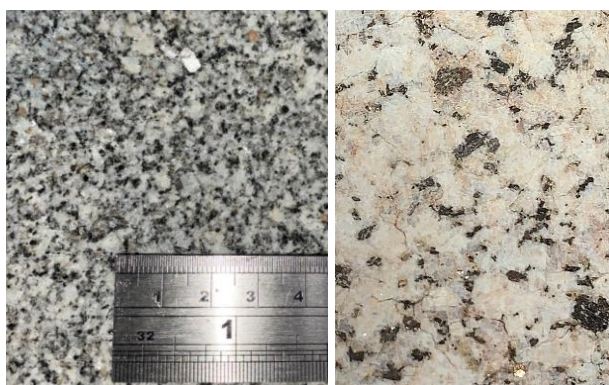


Рисунок 5. Внешний вид Ташмурунского гранита до нагрева (слева) и после нагрева до 800°C (справа).

Образец TG-714h испытывался в сухом состоянии, а образец TG-715h перед экспериментом был насыщен минеральным маслом, которое в данном исследовании, использовалось в качестве модельного аналога пластовой жидкости и воспроизведения естественного состояния насыщения горной породы. В качестве агента гидроразрыва был выбран сшитый гель – дизельная система 3 (ДС-3), вязкость которого при 100 с⁻¹ составляет 1220 сП. Жидкость была закачана с постоянной скоростью 5 мл/мин. Условия

эксперимента задавались одинаковые для двух образцов: $\sigma_1=\sigma_2=22$ МПа; $\sigma_3=8$ МПа, что соответствует осевому раскрытию трещины гидроразрыва.

Рисунок 6 демонстрирует сравнение параметров трещины гидроразрыва, зарегистрированных во время закачки жидкости в сухой (слева) и насыщенный (справа) трещиноватые образцы. Красные кривые (Рисунок 6а-г) показывают, что на начальной стадии эксперимента давление жидкости линейно увеличивается и отклоняется от линейного тренда на более поздней стадии.

Анализ синих кривых (Рисунок 6в-е) показывает, что утечка жидкости в трещиноватую матрицу горной породы началась при давлениях 26,7 и 16,5 МПа, и скорости утекания жидкости составили 2,8 мл/мин и 1,8 мл/мин для сухого и насыщенного образцов соответственно. Поскольку скорость закачки жидкости была равна 5 мл/мин, то трещина гидроразрыва была успешно инициирована в двух трещиноватых образцах, однако, если предположить, что жидкость закачивалась бы в образец со скоростью равной или меньшей скорости утечки 1,8 мл/мин, то выполнить успешно гидроразрыв было бы невозможно поскольку вся закачанная жидкость полностью уходила бы в трещиноватую матрицу. Таким образом, наши экспериментальные исследования подтвердили, что утечку следует учитывать при гидроразрыве пласта коллекторов с высокой плотностью естественных трещин.

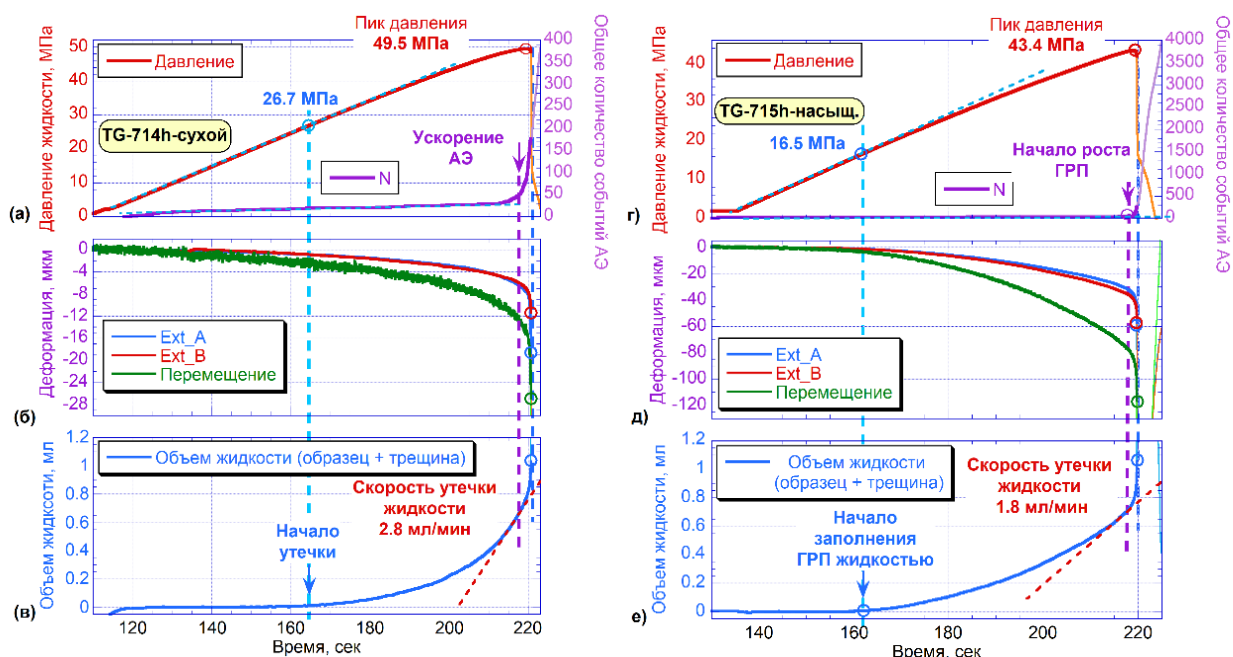


Рисунок 6. Образцы TG-714h сухой (слева) и TG-715h насыщенный (справа): (а),(г) давление жидкости (красный) и общее количество заложившихся сигналов АЭ (фиолетовый); (б),(д) осевая деформация, измеренная слева (Ext_B, красный) и справа (Ext_A, синий) экстензометры и кривая, демонстрирующая положение загрузочного поршня (зеленый); (в),(е) объем жидкости в трещине гидроразрыва. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Для лабораторных экспериментов гидроразрыва, описанных в разделах 3.1 –3.2, были напрямую измерены ключевые параметры гидроразрыва, такие как давление инициации трещины и давление гидроразрыва, осевая деформация образца, которая вызвана раскрытием трещины гидроразрыва, объем жидкости, закачанный в инициированную трещину, скорость распространения трещины. Эти измерения были зарегистрированы трехкомпонентной системы мониторинга напрямую и независимо друг

от друга, позволяют выполнять комплексный анализ динамики распространения трещины гидроразрыва, что подтверждает обоснованность и достоверность *первого научного положения*.

Раздел 3.3 посвящен анализу шероховатости и извилистости поверхности инициированных в цилиндрических образцах трещин гидроразрыва. Как было показано в существующих ранее исследованиях, на эффективность операций гидроразрыва также влияет подбор подходящей фракции проппанта и его доставка в трещины. Извилистость и шероховатость могут в значительной степени осложнять распределение проппанта в трещине. Поэтому в данном разделе была рассмотрена актуальная задача определения зависимости топографии поверхности трещины гидроразрыва от вязкости закаченной жидкости, которую необходимо учитывать при моделировании потока жидкости в трещине ГРП.

Среднеквадратичная шероховатость R_{rms} , была рассчитана по формуле

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_a)^2}, \text{ где } z_i - \text{высота } i\text{-й точки, а } z_a - \text{средняя высота}$$

плоскости наилучшего соответствия (best-fit). Извилистость определяется как отношение длины траектории трещины, представляющей собой ломаную линию, к длине кратчайшего расстояния между начальной и конечной точками траектории трещины, представляющего собой прямую линию. Для расчета было выделено подмножество точек, лежащих вдоль самой крутой линии, и рассчитана сумма 3D-расстояний между соседними точками. Для получения значения извилистости полученное значение было разделено на сумму 2D-расстояний между соседними точками того же подмножества.

Так как все цилиндрические образцы перед испытанием помещались в непроницаемую оболочку, отделяющую их от обжимающей жидкости, то по достижении трещиной боковой поверхности жидкость распределяется по поверхности образца, изменяя напряженное состояние в нем. Поэтому, для достоверного расчета шероховатости и извилистости был выделен начальный сектор распространения трещины по данным АЭ, когда жидкость гидроразрыва еще не достигла боковой поверхности образца.

Связь между вязкостью агента гидроразрыва и рассчитанной среднеквадратичной шероховатостью (R_{rms}) не выявлена в пределах выбранного сектора (*Рисунок 7*). По всей видимости, решающее значение в определении шероховатости в данном случае имеет средне-крупнозернистая структура Покостовского гранита.

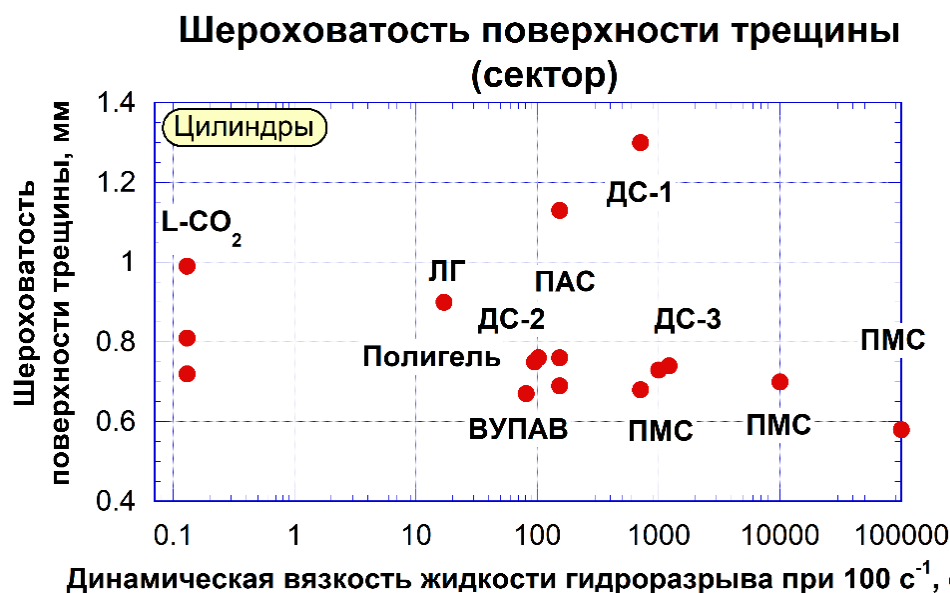


Рисунок 7. Взаимосвязь шероховатости образовавшейся поверхности трещины гидроразрыва и вязкости (в пределах выбранного сектора).

Извилистость трещины хорошо взаимосвязана с реологией закачиваемой жидкости: извилистость уменьшается с увеличением вязкости агента гидроразрыва (Рисунок 8).

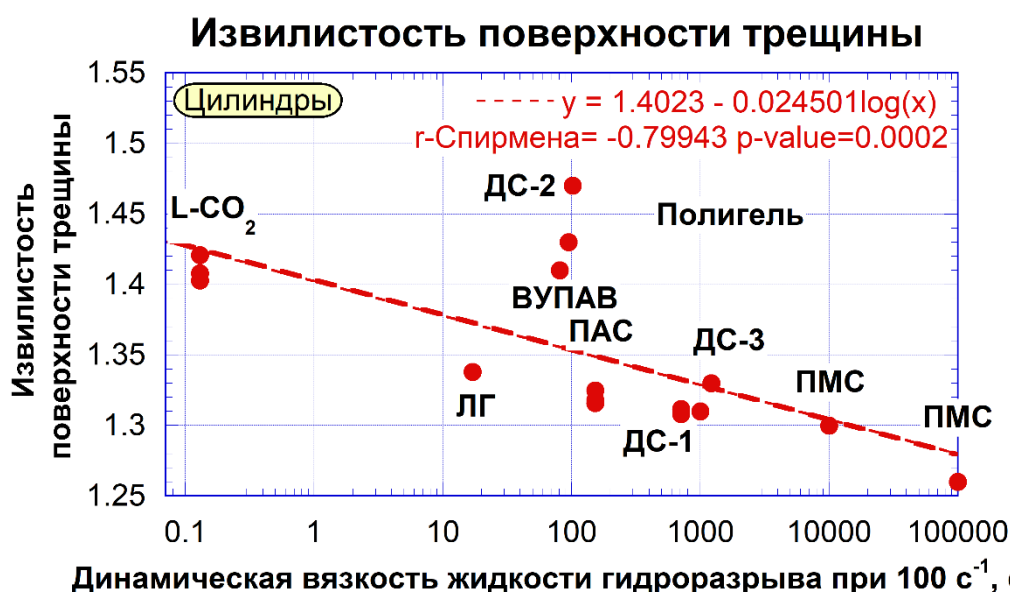


Рисунок 8. Взаимосвязь извилистости образовавшейся поверхности трещины гидроразрыва и вязкости.

Стоит помнить, что значительная извилистость в сочетании с недостаточным раскрытием трещины гидроразрыва при закачке агентов гидроразрыва с низкой вязкости может негативно отразиться на доставке и распределении пропантанта. Поэтому необходимо учитывать топологию трещины при моделировании потока жидкости в трещине ГРП. Экспериментально показано, что закачка маловязких жидкостей индуцирует трещины гидроразрыва с большей извилистостью поверхности, что в масштабах резервуара будет воплощаться в геометрически сложную сеть трещин. Приведенные результаты подтверждают обоснованность и достоверность *второго научного положения*.

Четвертая глава посвящена анализу параметров трещины гидроразрыва, инициированной в кубических образцах Ташмурунского гранита ($25\text{ см} \times 25\text{ см}$). Лабораторные испытания проводились на кубических образцах в истинно трехосных условиях $\sigma_1=12\text{ МПа}$, $\sigma_2=8\text{ МПа}$, $\sigma_3=4\text{ МПа}$. Скорость закачки жидкости была постоянной и составляла 5 мл/мин . Агенты гидроразрыва, использованные в данной части исследования: жидкий CO_2 , ЛГ, ПАС, ДС-1. Сравнение результатов, полученных на цилиндрах диаметром 10 см и на кубических образцах, длина грани которых составляет 25 см , может быть использовано для калибровки масштабирования моделей распространения трещины ГРП.

Анализ зарегистрированных во время эксперимента параметров (Рисунок 9) показывает большее значение давления гидроразрыва при закачке в кубический образец более вязкого сшитого геля ДС-1. Также при закачке более вязкого агента было зарегистрировано практически в пять раз большее количество сигналов АЭ. Различие в значениях скорости роста трещины гидроразрыва не было зарегистрировано.

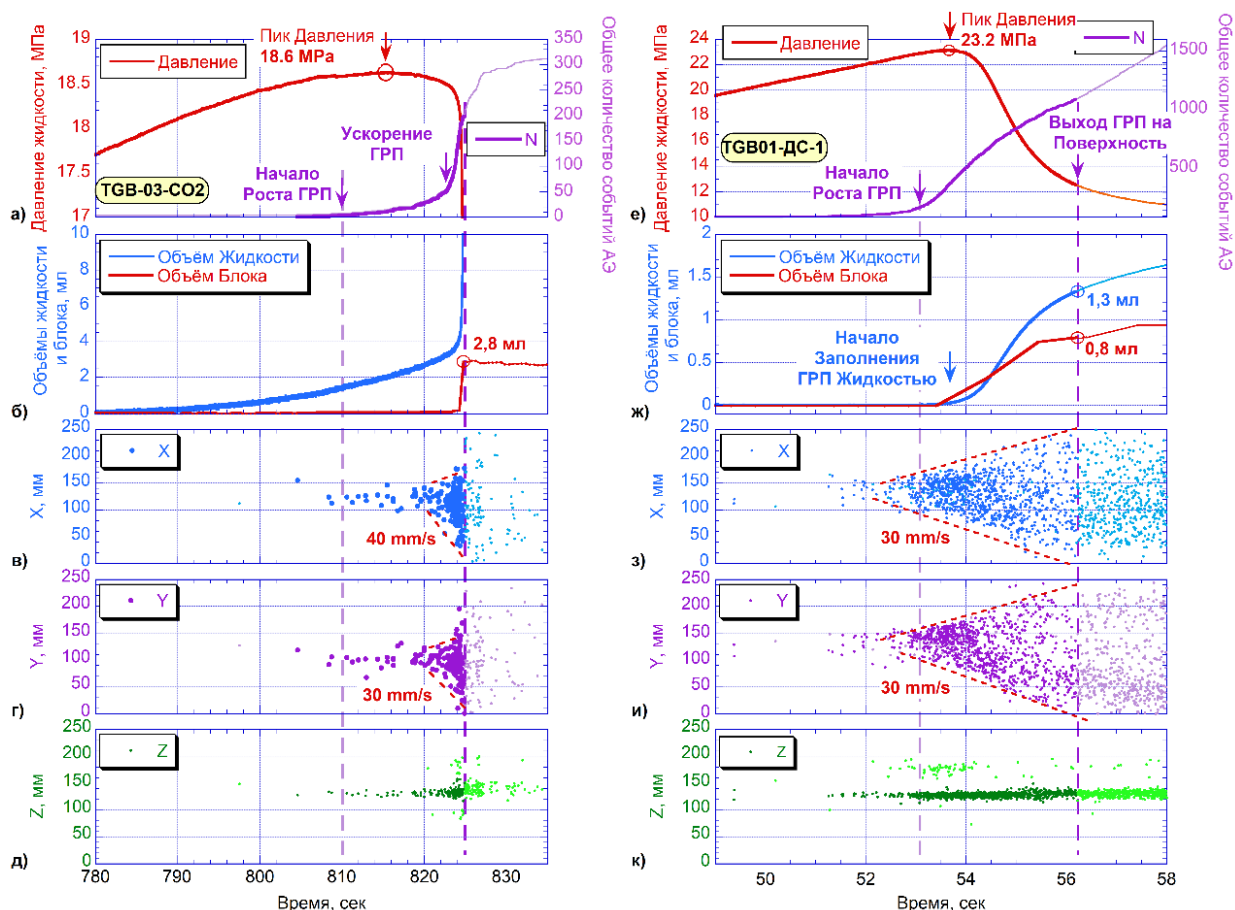


Рисунок 9. Образцы TGB-03- CO_2 (слева) и TGB-01-ДС-1 (справа): (а),(е) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное количество заложированных сигналов АЭ (фиолетовый); (б),(ж) объём жидкости, выдавленной из плоских домкратов (красный), и объём жидкости в трещине гидроразрыва (голубой); (в),(з) горизонтальные координаты заложированных сигналов АЭ по направлению X; (г),(и) горизонтальные координаты заложированных сигналов АЭ по направлению Y; (д),(к) вертикальные координаты заложированных сигналов АЭ. Все параметры построены от времени эксперимента.

Рисунок 10 демонстрирует три ортогональные проекции распределения заложированных сигналов АЭ в пространстве для трех стадий эксперимента. На стадии (а)

наблюдается меньшее число акустических события при закачке маловязкого агента гидроразрыва, чем при закачке более вязкого ДС-1. На стадии (ab) количество акустических событий увеличилось в 2 раза для обоих образцов. На стадии (с) показана наибольшая активность АЭ, наблюдаемая после достижения трещиной гидроразрыва поверхности блока.

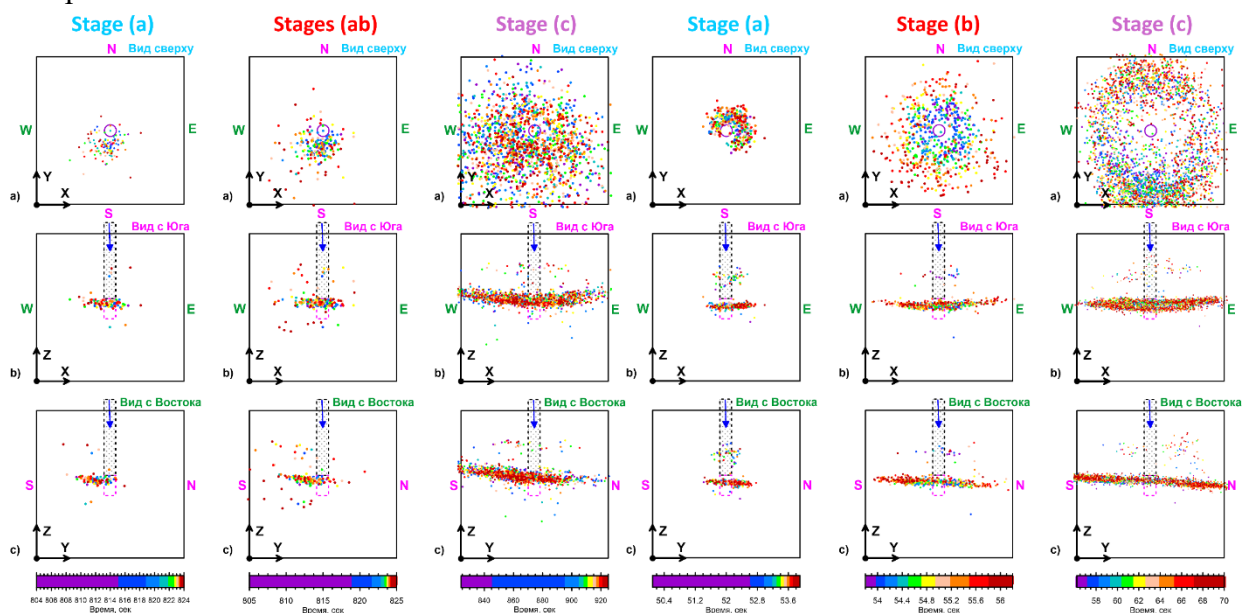


Рисунок 10. Три ортогональные проекции положения заложированных сигналов АЭ в пространстве для образцов TGB-03- CO₂ (слева) и TGB-01-DS (справа) для трёх стадий развития трещины гидроразрыва: (a), (ab), (c), соответственно.

Рисунок 11 демонстрирует хорошее соответствие между заложированными сигналами АЭ и инициированной трещиной, показанной на фотографиях нижней части разрушенных блоков.

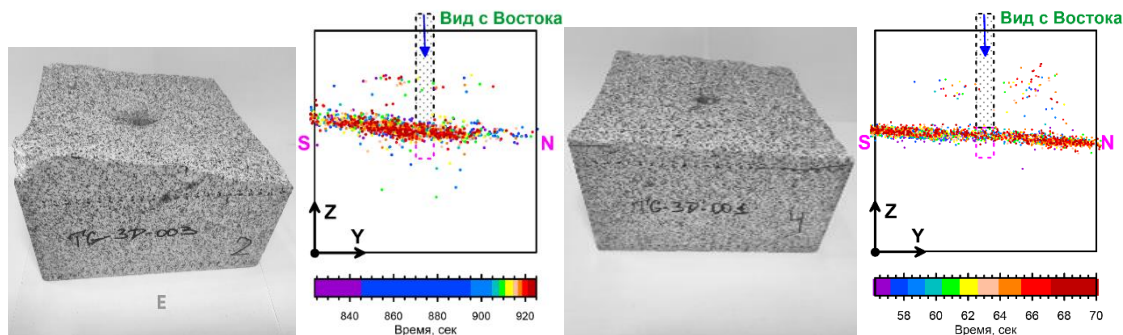


Рисунок 11. Фотография нижней части кубических образцов Ташмурунского гранита TGB-03-CO₂ (слева) и TGB-01-ДС-1 (справа) после эксперимента гидроразрыва и соответствующая ей проекция АЭ.

Сопоставление результатов экспериментов гидроразрыва, полученных на цилиндрических образцах диаметром 10 см и на кубических образцах, длина грани которых составляет 25 см, демонстрирует похожие линейные зависимости между параметрами трещины и вязкостью закачиваемого агента. При сравнении результатов, полученных в псевдо-трехосной и истинно трехосной системах нагружения, закачка более вязкого агента гидроразрыва вызывает большее удлинение образцов, напрямую связанное с раскрытием инициируемой трещины гидроразрыва (Рисунок 12).

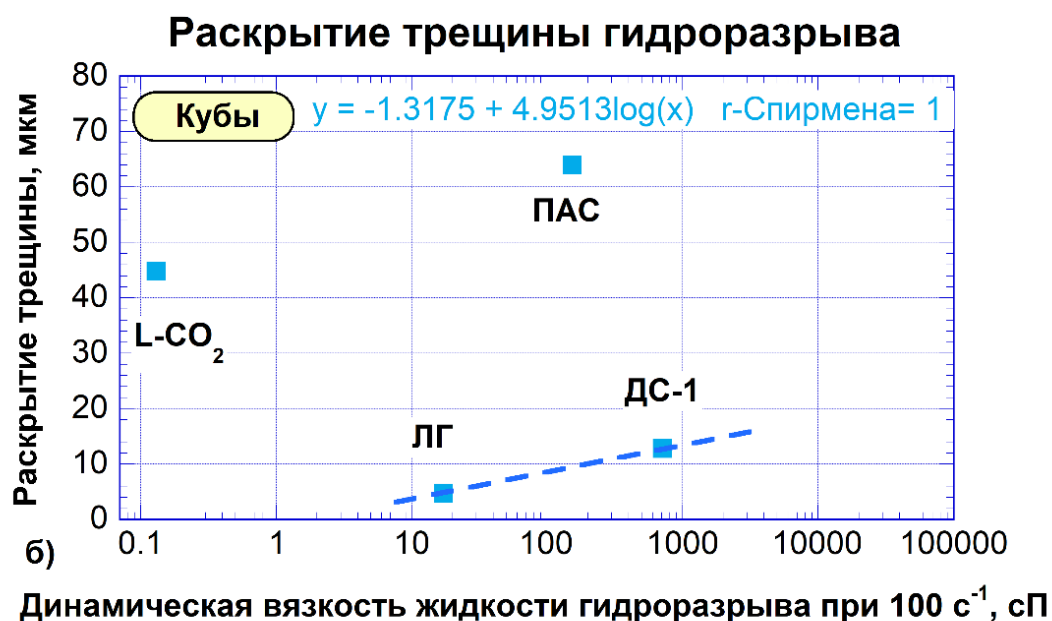
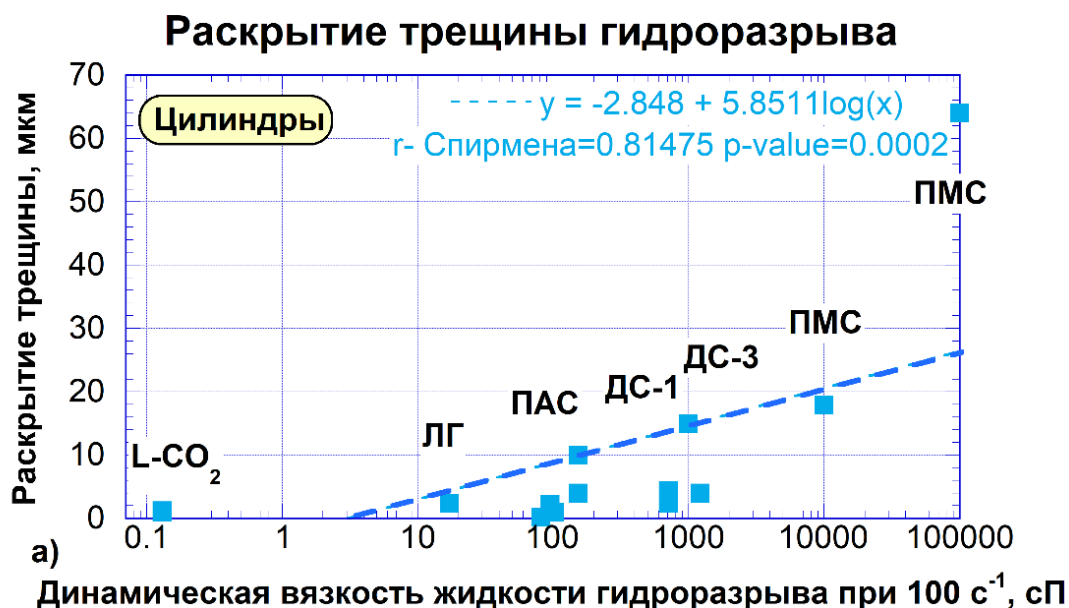
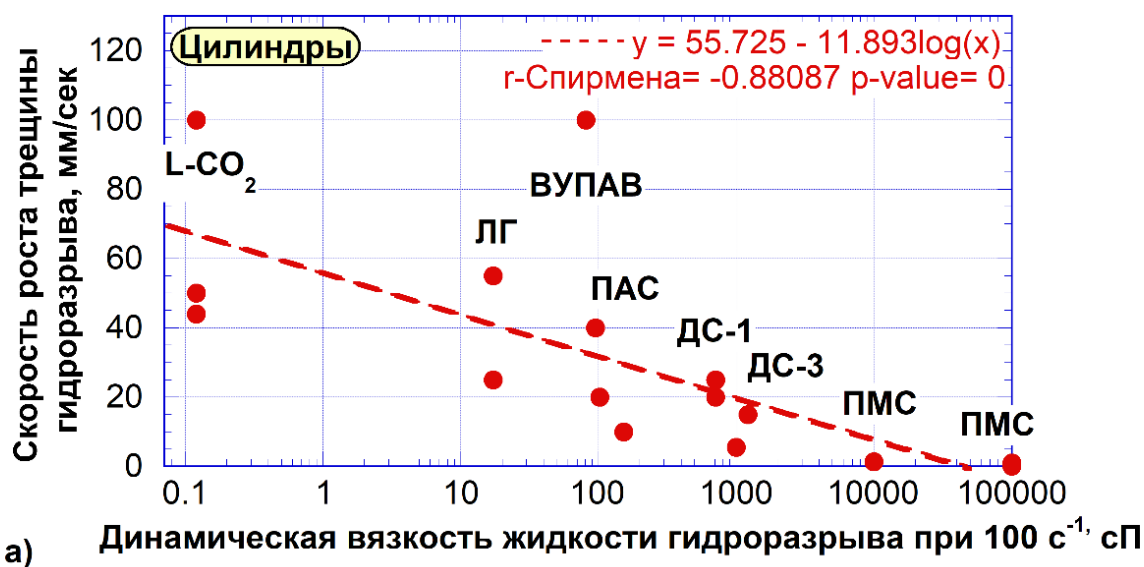


Рисунок 12. Взаимосвязь раскрытия трещины гидроразрыва и вязкости закачиваемой жидкости для образцов цилиндрической (а) и кубической формы (б).

Также была выявлена похожая ниспадающая взаимосвязь между скоростью роста трещины и вязкость инициирующего ее агента, независимо от формы образца и нагрузочной установки (Рисунок 13). Следует отметить, что для цилиндрических образцов была получена более достоверная корреляция.

Скорость роста трещины гидроразрыва



Скорость роста трещины гидроразрыва

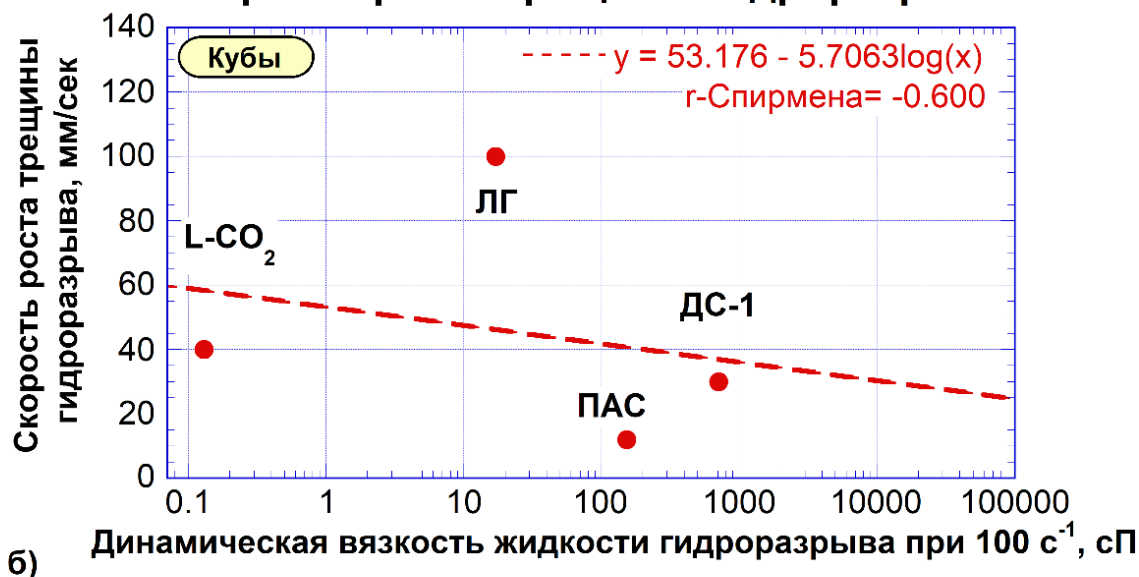
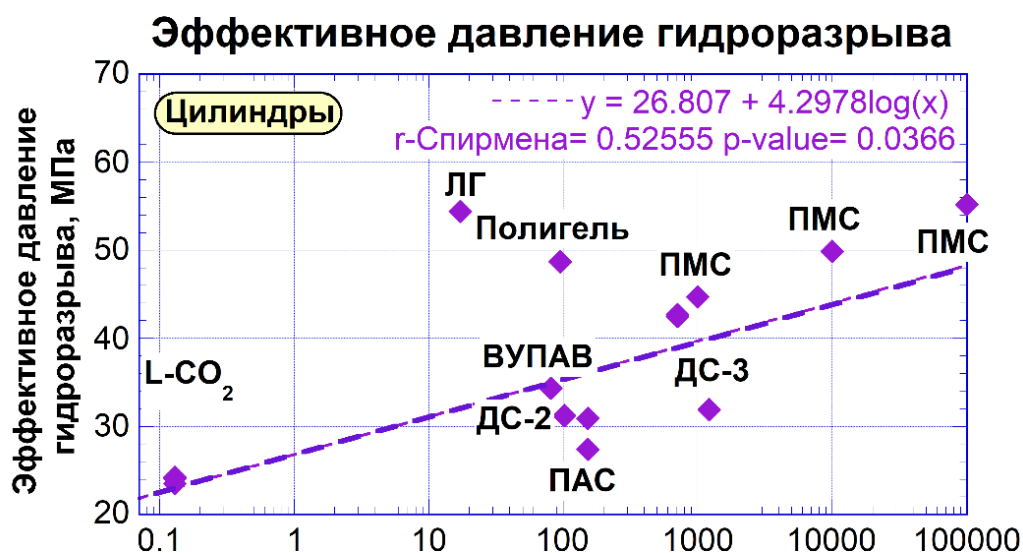
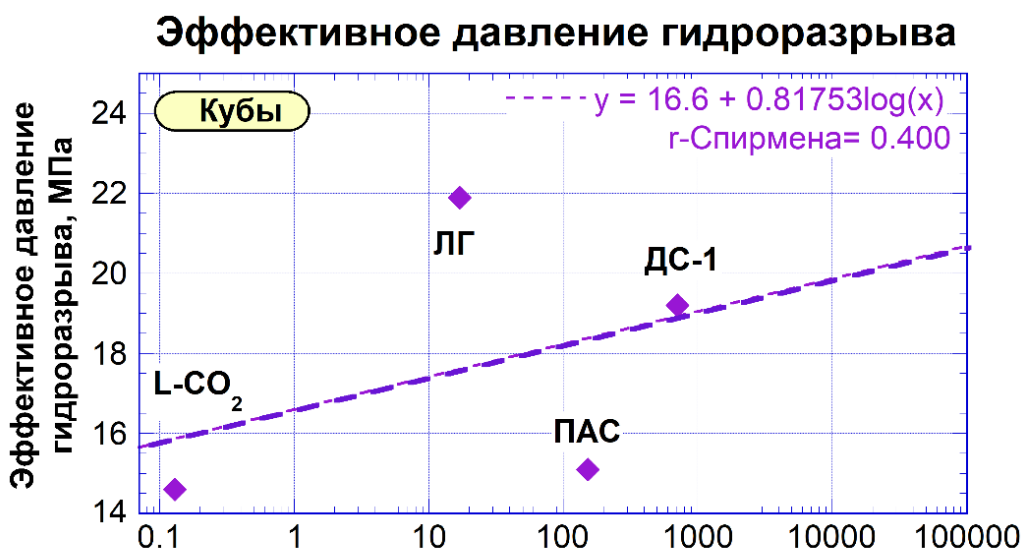


Рисунок 13. Взаимосвязь скорости роста трещины гидроразрыва и вязкости закачиваемой жидкости для образцов цилиндрической (а) и кубической формы (б).

Для сопоставления значений давления гидроразрыва P_b (максимальное давление жидкости в стволе скважины) были рассчитаны эффективные значения давления гидроразрыва P_{net} по формуле $P_{net} = P_b - \sigma_3$, где σ_3 – минимальное главное напряжение. Следует отметить общую закономерность увеличения значений давления гидроразрыва с увеличением вязкости инициирующей гидроразрыв жидкости (Рисунок 14). Однако, были обнаружены различия в абсолютных значениях эффективных давлений гидроразрыва для цилиндров и кубов при закачке одинаковых жидкостей. Это может быть связано как с различием в геометрии образцов/скважин, так и с наличием надразов, направляющих трещины гидроразрыва, а также с различием жесткостей систем закачки и поддержания давления.



а) Динамическая вязкость жидкости гидроразрыва при 100 с^{-1} , сП



б) Динамическая вязкость жидкости гидроразрыва при 100 с^{-1} , сП

Рисунок 14. Взаимосвязь эффективного давления образования трещины гидроразрыва и вязкости закачиваемой жидкости для образцов цилиндрической (а) и кубической формы (б).

Взаимосвязи, полученные для цилиндрических образцов, испытанных в псевдо-трехосных условиях, подтверждаются взаимосвязями, полученным для кубических образцов, испытанных в истинно трехосных условиях. Все полученные зависимости были получены впервые для исследованных горных пород и представленного набора жидкостей и могут быть использованы для верификации модели гидроразрыва. Приведенные результаты подтверждают обоснованность и достоверность *третьего научного положения*.

Пятая глава посвящена лабораторным исследованиям параметров трещины гидроразрыва, инициируемой в образцах осадочных пород – сланце и песчанике.

В разделе 5.1 рассматривается влияние слоистости, природных трещин, включений на параметры и динамику трещины гидроразрыва. Исследования проводились на шести цилиндрических образцах (5 см×10 см) сланцев, отобранных из Ерусланской скважины, но с разных интервалов глубины. Это отразилось на литологическом описании и прочностных свойствах образцов. Лабораторные испытания проводились в псевдо-трехосных условиях, близких к условиям их естественного залегания: $\sigma_1 = 54,8$ МПа, $\sigma_2 = \sigma_3 = 27,4$ МПа. В данном эксперименте раскрытие трещины происходило в вертикальном направлении. Скорость закачки жидкости была постоянной и составляла 5 мл/мин. Чтобы достичь немеченой цели представленного в данном разделе исследования, в образцы закачивался один агент гидроразрыва – минеральное масло (вязкость 46 сП).

Рисунок 15 демонстрирует сравнение параметров трещины гидроразрыва, полученные в образцах сланцев ARE-3R1 и ARE-8R1. В образце ARE-3R1 трещина распространялась симметрично, в то время как в образце ARE-8R1 трещина росла по направлению в верхнем торце (в верхней половине образца). Это вызвало значительные различия в раскрытии трещины.

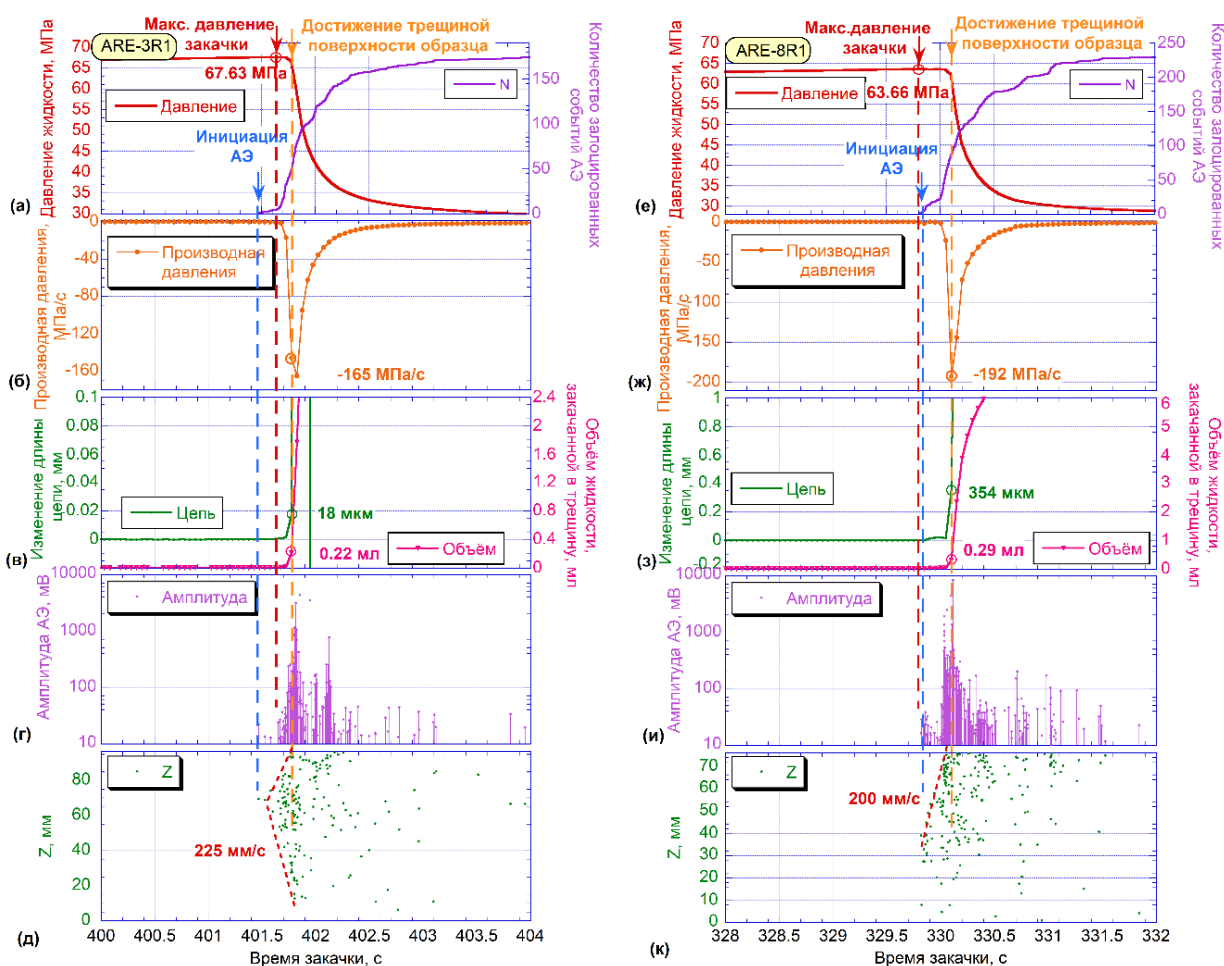


Рисунок 15. В левом столбце показаны результаты ARE-3R1, а в правом столбце – результаты ARE-8R1. (а),(е) Давление закачиваемой жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (б),(ж) скорость изменения давления в стволе скважины; (в),(з) изменение длины цепи (поперечного деформометра) (зеленый) и объема жидкости, поступившей в трещину гидроразрыва (пурпурный); (г),(и) амплитуда сигналов АЭ; (д),(к) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ. Все параметры отображаются в зависимости от времени тестирования образца.

Кроме того, в исследовании была получена взаимосвязь между прочностными свойствами сланцевых образцов – пределом прочности на растяжение (Бразильский тест) и характеристиками инициированной в них трещины гидроразрыва – давлением гидроразрыва. Было показано, что в образце сланца, которому характерно большее значение предела прочности на растяжение, трещина будет формироваться при большем значении давления гидроразрыва P_b (Рисунок 16).

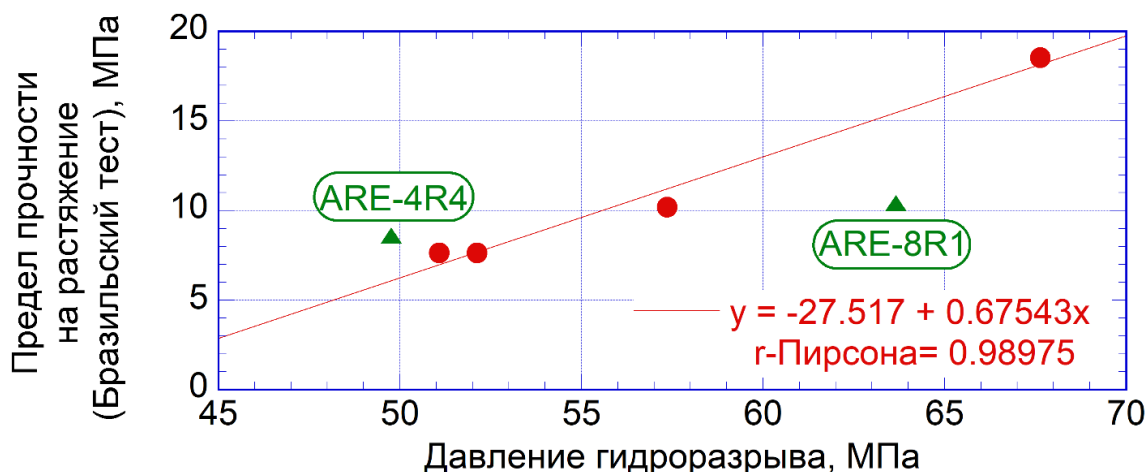


Рисунок 16. Взаимосвязь прочности на растяжение и давления гидроразрыва.

Рисунок 17 демонстрирует фотографии образцов сланцев ARE-3R1 и ARE-8R1 после эксперимента.

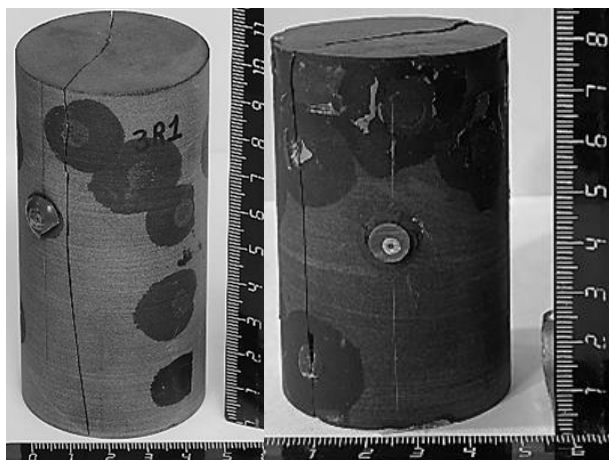
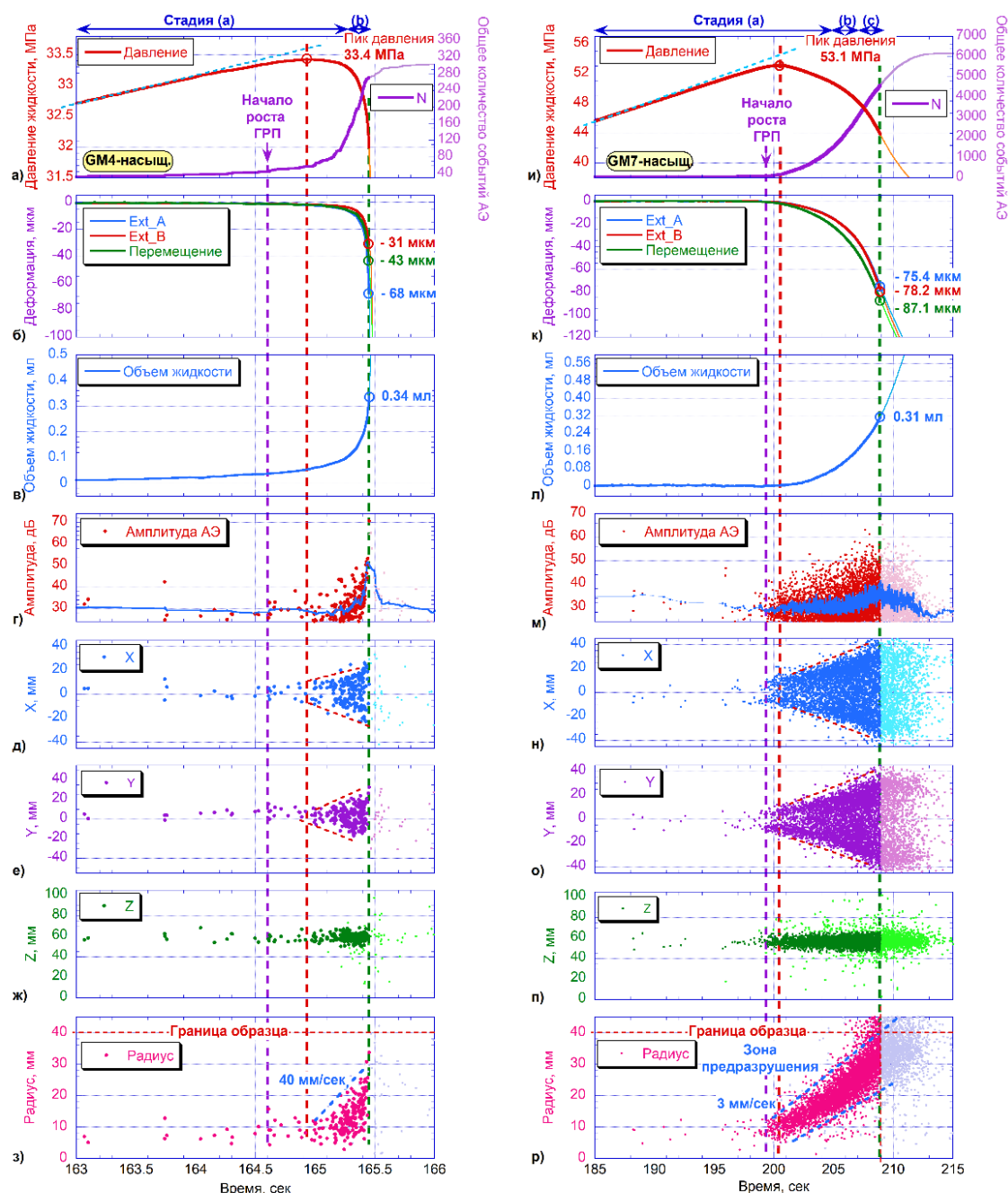


Рисунок 17. Фотографии образцов сланцев ARE-3R1 и ARE-8R1 после эксперимента.

В разделе 5.2 изучалось влияние насыщенности горной породы и вязкости закачиваемого агента гидроразрыва на параметры инициированной трещины в четырех цилиндрических образцах песчаника. Часть цилиндрических образцов однородного песчаника (8 см×10 см) насыщалась минеральным маслом, воссоздавая состояние естественного флюидонасыщения горной породы, а вторая часть тестировалась в сухом состоянии. Лабораторные испытания проводились в псевдо-трехосных условиях $\sigma_1=\sigma_2=22$ МПа, $\sigma_3=8$ МПа. Скорость закачки жидкости была постоянной и составляла 5 мл/мин. Агенты гидроразрыва, использованные в данной части исследования: ДС-3, ПМС-10 000, ПМС-100 000 (Рисунок 18).



GM4-101

GM7-101

Рисунок 18. Параметры, зарегистрированные при закачке сшитого геля ДС-3 (GM4-101, левая колонка) и силиконового масла ПМС-100 000 (GM7-101, правая колонка): (а),(и) давление жидкости гидроразрыва (красный) и общее количество обнаруженных сигналов АЭ (фиолетовый); (б),(к) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение поршня (зеленый); (в),(л) объем жидкости в трещине; (г),(м) амплитуды сигналов АЭ; (д),(н) горизонтальные координаты заложившихся сигналов АЭ в направлении X; (е),(о) горизонтальные координаты заложившихся сигналов АЭ в направлении Y; (ж),(п) вертикальные координаты локализованных сигналы АЭ; (з),(р) распределение расстояний между заложившимися сигналами АЭ и осью образца. Все параметры отображаются в зависимости от времени эксперимента.

При закачке менее вязкого ДС-3 наблюдалось меньшее значение давления гидроразрыва P_b (Рисунок 18а, красная кривая), меньшее раскрытие трещины (Рисунок 18б) и большая скорость распространения трещины гидроразрыва (Рисунок 18з) по

сравнению с аналогичными параметрами, представленными в правой колонке графиков, зарегистрированными при закачке более вязкого агента гидроразрыва – ПМС-100 000. Полученные результаты демонстрируют, что в лабораторных условиях возможно осуществить прямые измерения ключевых параметров трещины гидроразрыва (эффективное давление гидроразрыва, раскрытие трещины, скорость роста трещины) и выполнить экспериментальную проверку моделей распространения трещины ГРП, инициируемой жидкостями с различными реологическими свойствами.

Рисунок 19 демонстрирует три ортогональные проекции положения заложившихся сигналов акустической эмиссии (АЭ) во времени, соответствующие стадиям развития трещины гидроразрыва. Стоит отметить, что в обоих образцах песчаника были инициированы радиальные трещины гидроразрыва, что свойственно при закачке вязких агентов гидроразрыва. Однако, в образце GM7-101 можно проследить очень четкий фронт предразрушения трещины (Fracture process zone). Заметим, что в случае закачки высоковязкой жидкости существование запаздывания между зоной предразрушения и фронтом распространения жидкости было экспериментально подтверждено ранее известными исследованиями. Принимая во внимание симметрию деформации образца, можно предположить, что в данных экспериментах фронт жидкости также распространяется радиально.

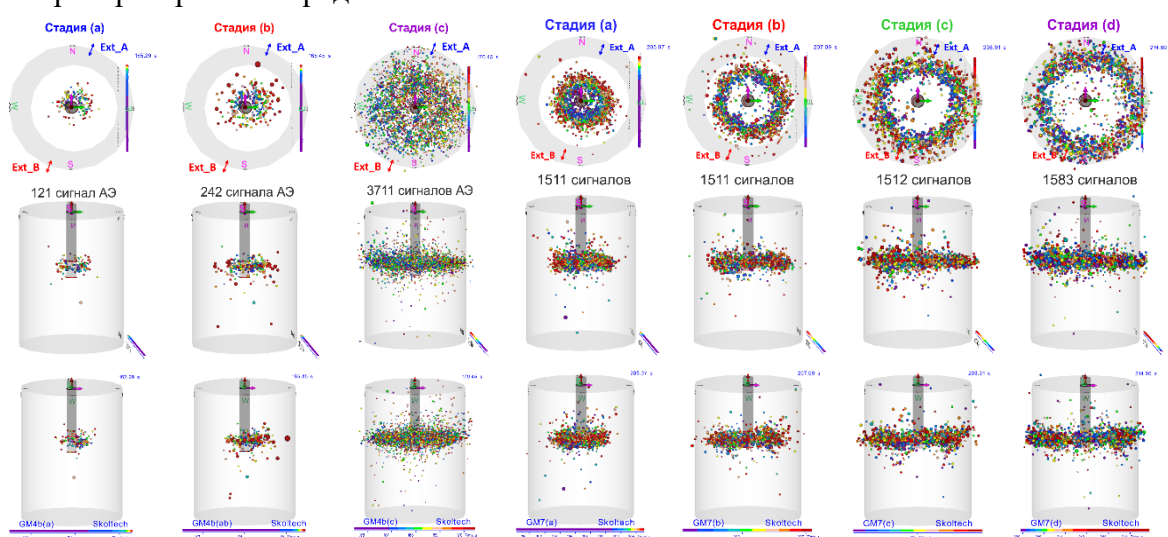


Рисунок 19. Три ортогональные проекции положений сигналов АЭ в пространстве образцов GM4-101 (слева) и GM7-101 (справа).

Рисунок 20 демонстрирует фотографии образцов омских песчаников после экспериментов. Стоит отметить, заложившиеся сигналы АЭ повторяют геометрию инициированной трещины.

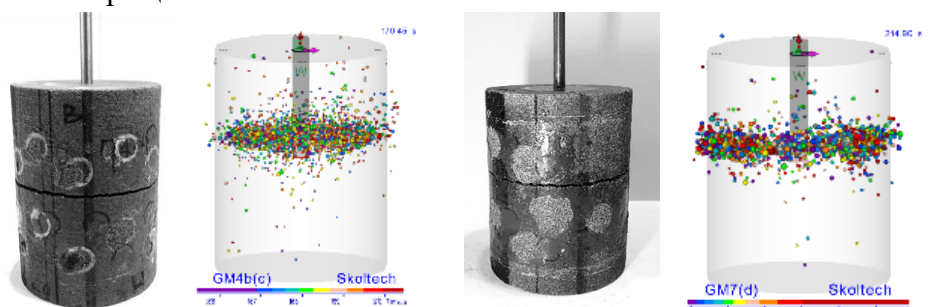


Рисунок 20. Фотографии образцов песчаника GM4-101 и GM7-101 после эксперимента и аналогичные проекции заложившихся акустических сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи выявления закономерностей изменения параметров трещины гидроразрыва от вязкости иницирующей жидкости в условиях псевдо-трехосных и истинно трехосных условий нагружения, что имеет важное значение для развития методов гидроразрыва массивов горных пород и освоения ресурсов Земли в целом.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработана специальная методика проведения лабораторных экспериментов гидроразрыва в полноразмерном керне (10 см×10 см) и в блоках породы (25 см×25 см) с обеспечением непрерывного мониторинга параметров роста трещины гидроразрыва тремя независимыми системами наблюдения: датчиками акустической эмиссии и ультразвукового прозвучивания; датчиками осевой и радиальной деформации образца во время роста трещины и датчиками давления и объема жидкости гидроразрыва. Разработанная методика позволяет проводить прямые и независимые измерения ключевых параметров трещины гидроразрыва (эффективное давление гидроразрыва, раскрытие трещины, скорость роста трещины) в образцах целевых горных пород с точностью 5 мм и выполнять комплексный анализ динамики её распространения в псевдо-трехосных и истинно трехосных условиях нагружения.

2. Экспериментально установлена взаимосвязь эффективного давления гидроразрыва от вязкости агента гидроразрыва. Более высокое эффективное давление гидроразрыва наблюдалось в экспериментах с закачкой более вязкой жидкости. Наименьшее эффективное давление гидроразрыва было зафиксировано при испытании с закачкой жидкого CO₂.

3. Экспериментально установлена взаимосвязь раскрытия трещины гидроразрыва и вязкости агента гидроразрыва. Закачка высоковязких жидкостей гидроразрыва обеспечивает большее раскрытие трещины и, как правило, больший объем жидкости был закачан в трещину до того, как трещина достигла поверхности образца.

4. Акустическая эмиссия (АЭ) увеличилась за несколько секунд до того, как было зафиксировано максимальное давление в скважине, что указывает на начало (инициацию) гидроразрыва пласта.

5. Экспериментально установлена взаимосвязь скорости распространения трещины гидроразрыва и вязкости агента гидроразрыва. Более высокая скорость распространения трещины гидроразрыва была обнаружена в экспериментах с закачкой жидкости низкой вязкости. Самое быстрое распространение трещины было зафиксировано в испытаниях с закачкой CO₂ и дистиллированной воды.

6. Показано, что сложность геометрии трещины полностью зависит от вязкости жидкости. Экспериментально установлено, что закачка жидкости гидроразрыва с низкой вязкостью обычно приводит к образованию более извилистых трещин.

7. Показано, что экспериментально выявленная утечка маловязких агентов гидроразрыва должна приниматься во внимание при проектировании закачки таких агентов в трещиноватые коллекторы.

8. Разработана методика проведения лабораторных экспериментов по инициации трещины гидроразрыва на образцах целевых горных пород, с целью оптимизации операций гидроразрыва пласта.

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

- в рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, а также индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. **Шевцова А.А.** Методика лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 7 (специальный выпуск №8), 20 с.

2. Bobrova M., Stanchits S., **Shevtsova A.**, Filev E., Stukachev V., Shayahmetov T. Laboratory Investigation of Hydraulic Fracture Behavior of Unconventional Reservoir Rocks // Geosciences. 2021. T. 11. № 7. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070292> (Квартиль по SJR Q2).

3. **Shevtsova A.**, Stanchits S., Bobrova M., Filev E., Borodin S., Stukachev V., Magadova L. Laboratory Study of the Influence of Fluid Rheology on the Characteristics of Created Hydraulic Fracture // Energies. 2022. T. 15. № 11. <https://doi.org/10.3390/en15113858> (Квартиль по SJR Q2).

4. **Shevtsova A.**, Stanchits S., Filev E., Karamov T., Stukachev V., Spasennykh M. Assessment of Saturation Effect on Hydraulic Fracturing in Sandstone and Thermally Treated Granite // Minerals. 2023. T. 13. № 6. <https://doi.org/10.3390/min13060777> (Квартиль по SJR Q2).

- в других изданиях:

5. Dotsenko A., Stukachev V., Andrade De Carli J. C., **Shevtsova A.**, Charara M. Analysis of Time-Dependent Behavior of Dynamic and Static Parameters of Preheated Westerly Granite for Microseismic Fracture Monitoring Experiments // SPE Russ. Pet. Technol. Conf. 2018. <https://doi.org/10.2118/191721-18RPTC-MS> (Scopus).

6. Bobrova, M., Filev, E., **Shevtsova, A.**, Stanchits, S., Stukachev, V., and Lecampion, B.: Influence of injection parameters on the dynamics of Hydraulic Fracturing monitored by Acoustic Emission // EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9423. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9423>, 2020.

7. **Shevtsova, A.**, Filev, E., Bobrova, M., Stanchits, S., and Stukachev, V.: Laboratory study of Hydraulic Fracture interaction with artificial interfaces // EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9408. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9408>, 2020.