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

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. Анализ современного состояния в области экспериментального изучения процесса гидроразрыва пласта и постановка задачи исследования 9

1.1 Технология гидравлического разрыва пласта (ГРП) 9

1.2 Жидкости гидроразрыва 12

1.3 Акустическая эмиссия (АЭ) 19

1.4 Лабораторные исследования гидроразрыва 19

1.5 Усовершенствованная геотермальная система (Enhanced geothermal system) 21

1.6 Трещиноватые коллекторы 22

1.7 Недостатки существующих методов гидроразрыва пласта и постановка задачи исследования 23

2. Описание измерительного и испытательного оборудования, экспериментальной методики, горных пород и жидкостей гидроразрыва 26

2.1 Описание измерительного и испытательного оборудования 26

2.1.1 Псевдо-трехосная система нагружения цилиндрических образцов 26

2.1.2 Истинно трехосная система нагружения кубических образцов 30

2.2 Описание методик подготовки образцов, проведения экспериментов и расчетов параметров трещины 32

2.2.1 Методика изготовления и подготовки цилиндрических образцов к эксперименту 32

2.2.2 Экспериментальная методика (псевдо-трехосные условия нагружения) 36

2.2.3 Методика подготовки кубических образцов к эксперименту 39

2.2.4 Экспериментальная методика (истинно трехосные условия нагружения) 39

2.2.5 Методика расчетов статистических параметров стенок (поверхности) трещины гидроразрыва 40

2.2.6 Методика расчетов параметров трещины гидроразрыва 41

2.3 Описание магматических и осадочных горных пород 41

2.3.1 Покостовский гранит 41

2.3.2 Ташмурунский гранит 44

2.3.3 Трещиноватый Ташмурунский гранит (нагретый до 800°C) 46

2.3.4 Сланец 48

2.3.5 Песчаник 53

2.4 Описание жидкостей гидроразрыва 55

2.4.1 Жидкости гидроразрыва на водной основе 56

2.4.2 Безводные жидкости гидроразрыва пласта. 58

3. Результаты экспериментов по инициации трещины гидроразрыва жидкостями различной вязкости, полученные на полноразмерных (10 см×10 см) цилиндрических образцах магматических горных пород 64

3.1 Результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва на образцах магматических горных пород (Покостовский гранит, Ташмурунский гранит) 64
3.1.1 Жидкости гидроразрыва на водной основе 64
3.1.2 Безводные жидкости гидроразрыва 79
3.1.3 Выводы к разделу 3.1 114
3.2 Результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва на образцах трещиноватых магматических горных пород (трещиноватый Ташмурунский гранит) .114
3.2.1 Дизельная система 3 (ДС-3) 114
3.2.2 Выводы к разделу 3.2 118
3.3 Результаты компьютерной томографии и лазерного сканирования стенок (поверхностей) трещины гидроразрыва, полученных в цилиндрических образцах 119
Выводы к разделу 3.3 127
4. Результаты экспериментов по инициации трещины гидроразрыва жидкостями различной вязкости, полученные на кубических (25 см×25 см×25 см) образцах магматических горных пород 128
4.1 Дизельная система 1 (ДС-1) 128
4.2 Линейный гель (ЛГ) 131
4.3 Пенно-азотная система (ПАС) 134
4.4 Жидкий CO_2 (L-CO_2) 137
4.5 Результаты лабораторных экспериментов 141
4.6 Выводы к главе 4 144
5. Результаты экспериментов по инициации трещины гидроразрыва в цилиндрических образцах осадочных горных пород 146
5.1 Сланцы 146
5.1.1 Минеральное масло (Multitherm PG-1) 146
5.1.2 Анализ снимков рентгеновской компьютерной томографии цилиндрических образцов сланцев после испытаний 153
5.1.3 Выводы к разделу 5.1 155
5.2 Песчаник 156
5.2.1 Силиконовое масло (жидкость полиметилсилоксановая (ПМС)) ПМС-10 000 и ПМС 100 000 156
5.2.2 Дизельная система 3 (ДС-3) 159
5.2.3 Выводы к разделу 5.2 165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 166
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 168
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Справки о внедрении методики лабораторных исследований 179
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Методика лабораторных исследований 182

ВВЕДЕНИЕ

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 заключаются 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°С 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. Станчицу 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. Бородина 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.

1. Анализ современного состояния в области экспериментального изучения процесса гидроразрыва пласта и постановка задачи исследования

1.1 Технология гидравлического разрыва пласта (ГРП)

Технология гидравлического разрыва пласта (ГРП) заключается в закачке жидкости в низкопроницаемую горную породу со скоростью потока, достаточной для создания разветвленной сети трещин. Таким образом, в горной породе создаются высокопроницаемые пути и значительно повышается ее проводимость [Zhang и др., 2016]. Несмотря на то, что технология гидроразрыва пласта является относительно новой, с момента ее первой успешной коммерческой реализации в 1949 году [Clark, 1949] она нашла применение во многих отраслях [Haimson, 1978; Legarth, Huenges, Zimmermann, 2005; Mao и др., 2017; Weeren, 1966]. В нефтегазовой промышленности данная технология признана наиболее эффективной для интенсификации добычи нефти и газа из низкопроницаемых коллекторов и способствует увеличению выработки запасов нефти [Попов, Метляев, 2017; Савенок, Поварова, Аванесов, 2018]. Также, технология гидроразрыва нашла широкое применение в области разработки геотермальных ресурсов (Enhanced Geotermal system) [Kumari и др., 2018]. Кроме того, гидроразрыв используется в горном деле для дегазации и снижения опасных напряжений в массиве вокруг горных выработок при добыче угля [Курленя и др., 2017; Розонов, 2021; Сердюков, Курленя, 2019]. К тому же, гидравлический разрыв пласта является основным методом измерения напряжений в пласте в проектах, связанных с добычей полезных ископаемых и геотехникой [Raaen и др., 2001; Курленя, Леонтьев, Попов, 1994]. В дополнение к уже описанным областям применения, этот метод используется для разработки залежей метана в угольных пластах [Zhang и др., 2013; Zhang, Bian, 2015] и для утилизации отходов [Hainey и др., 1999].

В последнее десятилетие в связи с приближающимся истощением имеющихся традиционных месторождений нефти и газа нетрадиционные ресурсы нефти и газа становятся всё более перспективными источниками углеводородов [Tan и др., 2021]. В настоящее время в США, Канаде и Китае уже широко ведется разведка и добыча сланцевой нефти и газа [Soeder, 2018]. В России также имеется достаточный энергетический потенциал, значительная часть которого относится к нетрадиционным коллекторам углеводородов (Ачимовская свита, Баженовская свита, Доманиковская свита) [Bukharov и др., 2020; Henderson, 2013; Бек и др., 2017; Миляев, Савельева, 2017].

Как известно из публикации [Deng и др., 2013], нетрадиционным коллекторам углеводородов характерны сверхнизкая проницаемость, незначительная пористость и наличие естественных трещин. Рисунок 1 демонстрирует классификацию коллекторов на основе фильтрационных свойств и соответствующих им методов добычи углеводородов.

1 нД	**Сланцевый коллектор**	1мкД	**Плотный коллектор**	1 мД	**Традиционный коллектор**	1 Д
	ГРП и горизонтальное бурение		Требуется ГРП		ГРП не всегда необходим для стимулирования добычи	

Рисунок 1. Иллюстрация типов коллекторов на основе их проницаемости и методов добычи [Speight, 2017].

Гидравлический разрыв пласта сложен, поскольку он включает в себя четыре различных типа механики: гидромеханику, механику твердого тела, механику разрушения и термомеханику. При гидроразрыве пласта гидромеханика описывает течение одной, двух или трех фаз внутри трещины; механика твердого тела описывает деформацию или разрушение породы из-за давления жидкости; механика разрушения описывает все аспекты разрушения и отрыва, которые происходят вблизи кончика трещины гидроразрыва; а тепловая механика описывает теплообмен между жидкостью гидроразрыва и пластом [Mack, Warpinski, 2000]. Непосредственно полевые исследования ГРП являются достаточно сложными, поскольку механические характеристики, геологические условия и поля напряжений для каждого пласта различны и уникальны. В горном массиве действует равновесное объемное напряженное состояние. Естественное напряженное состояние в горном массиве можно описать следующим неравенством $\sigma_v = \sigma_1 > \sigma_H = \sigma_2 > \sigma_h = \sigma_3$, где максимальное главное напряжение σ_1 (maximal principal stress) соответствует литостатическому давлениею σ_v, среднее главное напряжение σ_2 соответствует максимальному горизонтальному напряжению σ_H, минимальное главное напряжение σ_3 (minimal principal stress) соответствует минимальному горизонтальному напряжению σ_h. Для инициации трещины гидроразрыва необходимо создать давление, превышающее концентрацию напряжений вокруг скважины на величину предела прочности породы на растяжение. Ориентация и геометрия трещин гидроразрыва трещин имеют решающее значение для эффективного извлечения добываемого ресурса. Давление разрушения и ориентация трещины зависят от преобладающих внутрипластовых напряжений [Hubbert, Willis, 1957]. Направление распространения трещин гидроразрыва в горном массиве, в основном, зависит от направления минимального главного напряжения σ_3 (minimal principal stress). В своей экспериментальной работе [Zoback и др., 1977] обнаружили, что трещина гидроразрыва всегда распространяются вдоль главного напряжения. Кроме того, разница горизонтальных напряжений определяет давление разрушения, форму, количество и распространение трещин (т.е. одиночных или множественных трещин) [Rabaa El, 1989].

При вертикальной ориентации скважины трещина гидроразрыва будет распространяться перпендикулярно минимальному главному напряжению σ_3. При горизонтальном бурении скважину могут ориентировать как вдоль минимального главного напряжения σ_3 с последующим созданием поперечных трещин гидроразрыва, так и перпендикулярно минимальному главному напряжению σ_3 с последующим созданием продольных трещин гидроразрыва. Уравнения 1–2 демонстрируют, что давление гидроразрыва (максимальное значение давления жидкости в скважине) P_b зависит от азимутального направления скважины. Рассмотрим две ситуации [Fjær и др., 2008]:

$$\text{Ствол скважины, параллельный } \sigma_H\text{:} \quad P_b = 3\sigma_h - \sigma_v - p_f + T_0, \qquad (1)$$

$$\text{Ствол скважины, параллельный } \sigma_h\text{:} \quad P_b = 3\sigma_H - \sigma_v - p_f + T_0, \qquad (2)$$

где σ_v – литостатическое давление; σ_h – минимальный горизонтальное напряжение; σ_H – максимальное горизонтальное напряжение; p_f – поровое давление; T_0 – прочность на разрыв.

Из уравнений (1) и (2) известно, что давление гидроразрыва в стволе скважины, параллельное σ_h, выше. В случае 1, описываемом уравнением (1), наименьшее напряжение в скважине перпендикулярно скважине, и трещина будет параллельна скважине (Рисунок 2, слева). В случае 2 (уравнение (2)) трещина будет распространяться перпендикулярно скважине (Рисунок 2, справа).

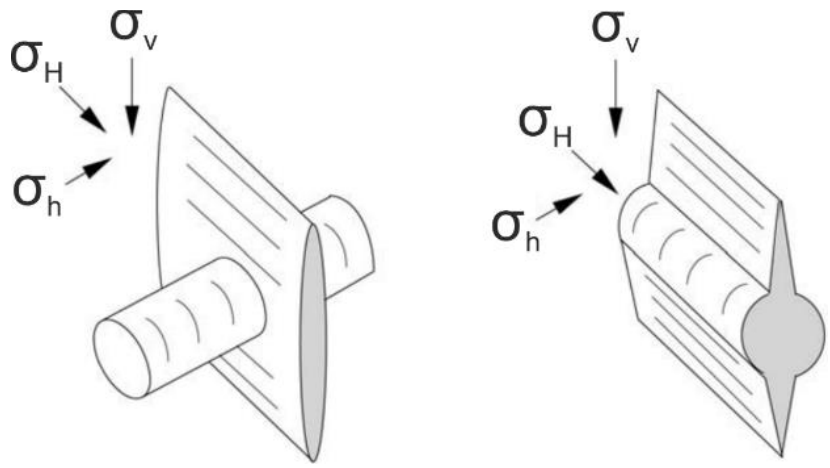


Рисунок 2. Иллюстрация ориентаций трещин гидроразрыва, параллельной стволу скважины (слева) и перпендикулярной стволу скважины (справа) [Fjær и др., 2008].

Существует множество моделей роста трещины гидроразрыва. Первые результаты разработки математической модели гидравлического разрыва пласта представлены в работах [Perkins, Kern, 1961; Желтов, Христианович, 1955]. Рисунок 3 демонстрирует простейшую модель радиальной симметричной трещины гидроразрыва.

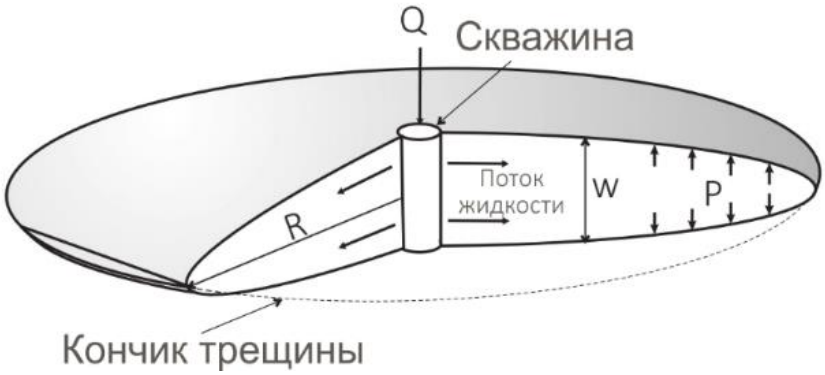


Рисунок 3. Иллюстрация модели радиальной (penny-shaped) трещины гидроразрыва.

Следующие решения для поля напряжений и давления гидроразрыва были получены [Sneddon, 1946] и [Sneddon, Elliot, 1946] для радиальной трещины под давлением. Исследователи показали, что раскрытие трещины W_{calc} радиальной трещины радиуса R под постоянным давлением может быть рассчитано с помощью выражения:

$$W_{calc} = \frac{3}{2}\frac{V_{calc}}{\pi R^2}, \quad (3)$$

где V_{calc} – объем трещины гидроразрыва.

$$V_{calc} = 16P_{net}\frac{(1-\mu^2)R^3}{3E}, \quad (4)$$

где эффективное давление P_{net} гидроразрыва определяется по формуле (5) как разница давления жидкости в трещине p_f и главного минимального напряжения σ_3, при котором трещина открывается [Mack, Warpinski, 2000]:

$$P_{net} = p_f - \sigma_3. \quad (5)$$

Развитие точного горизонтального бурения и многостадийного ГРП раскрыло потенциал ранее недоступных ресурсов, заключенных в нетрадиционных коллекторах [Abdelazim, Rahman, 2016]. Последние технологические достижения, сделавшие возможной добычу природного газа из так называемых нетрадиционных коллекторов, сделали практику применения гидроразрыва пласта для интенсификации добычи углеводородов более распространенной и повсеместной. Разработка многозабойных скважин в сочетании с направленным бурением, многостадийным гидроразрывом пласта, микросейсмическим мониторингом были особенно эффективны в последние годы применительно к сланцам, что сделало добычу газа из сланцев технически и финансово осуществимой [Lu и др., 2022].

1.2 Жидкости гидроразрыва

Жидкости гидроразрыва на водной основе

Первоначально операции ГРП проводились с использованием жидкостей на основе нефти и ее производных. Данные агенты были небезопасны из-за своей легкой

воспламеняемости, а кроме того вызывали серьезные загрязнения как почвы, так и грунтовых вод. Описанные проблемы подтолкнули промышленность к разработке более экологичных и безопасных жидкостей гидроразрыва на водной основе [Barati, Liang, 2014]. Уже в 1953 году были проведены первые операции ГРП с использованием воды в качестве жидкости гидроразрыва [Montgomery, Smith, 2010]. В эти же годы ученые приступили к разработке гелеобразователей, способных улучшить реологические свойства водных жидкостей гидроразрыва. Доля используемых жидкостей гидроразрыва на нефтяной основе снизилась на 80% в период с 1950 по 1980 годы, что сократило производственные затраты и риски [Howard, Fast, 1970; Richtering, 2001]. Жидкости на углеводородной основе сменили водные растворы полимеров [Fink, 2013; Fink, 2015].

Гуаровая камедь стала наиболее распространенным загустителем для водных жидкостей гидроразрыва [Dogon, Golombok, 2016]. Однако, высокая вязкость жидкости, необходимая для нормального удержания проппанта, способствует образованию коротких трещин с достаточным раскрытием. В то время как основной целью операций ГРП является создание длинной разветвленной сети проводящих трещин [Rimmer и др., 2000]. Кроме того, существует высокая вероятность закупоривания порового пространства пласта за счет формирования нерастворимых остатков неразрушенного полисахарида [Sullivan и др., 2006].

Для уменьшения негативного воздействия на пласт были разработаны жидкости на основе синтетических полимеров, таких как полиакриламид (ПАА) [Li, Tellakula, Rosencrance, 2015; Li и др., 2018], и жидкости на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ (ВУПАВ), которые являются бесполимерными жидкостями [Chieng и др., 2020; Daeffler и др., 2019; Durairaj, 2013; Lu и др., 2017; Mao и др., 2018; Shibaev, Osiptsov, Philippova, 2021; Yang и др., 2018; Zhang и др., 2019c; Силин и др., 2020]. Появившиеся в начале 1970-х годов сшивающие агенты на основе металлов для повышения вязкости жидкостей гидроразрыва на водной основе, которые стало возможно использовать в условиях высокой температуры, ознаменовали собой серьезное достижение в области разработки жидкостей гидроразрыва [Gandossi, Estorff Von, 2015].

Во избежание формирования устойчивых эмульсий из жидкости гидроразрыва и пластовой жидкости использовались поверхностно-активные вещества (ПАВ) [Магадова, Силин, Глущенко, 2012]. Позже были разработаны стабилизаторы глин, что позволило оптимизировать применение жидкостей гидроразрыва на водной основе для большего числа резервуаров [Mahmud, 2020].

За все время существования технологии ГРП были разработаны и применены разнообразные жидкости гидроразрыва: растворы полисахаридов и синтетических

полимеров природного происхождения, водные физико-химические гели, органические гели, мицеллярные растворы ПАВ, эмульсии и пены [Barbati и др., 2016]. В настоящее время такие водные жидкости, как кислоты, вода и рассолы с использованием расклинивающих агентов, используются примерно в 96% всех операций ГРП [Gaurina-Međimurec и др., 2021]. Однако огромный расход пресной воды и возможность химического загрязнения водоносных горизонтов до сих пор являются актуальными экологическими проблемами, связанными с операциями гидроразрыва пласта [Zhang и др., 2021]. К тому же, водные жидкости гидроразрыва могут вызвать закупоривание порового пространства и разрушительное набухание глиняного компонента водочувствительных резервуаров [Mojid и др., 2021].

Жидкости гидроразрыва на безводной основе

Как уже упоминалось ранее, для первых операций ГРП использовалась сырая нефть, а затем ее гелированные производные [Clark, 1949]. Авторы [Kalam и др., 2021] представляют обзор нескольких технологий безводного гидроразрыва пласта, уделяя особое внимание их механизмам, достоинствам и недостаткам. Усовершенствование ранее используемых и разработка новых безводных жидкостей гидроразрыва стали актуальными в последние годы. Так, набухание глинистой компоненты водочувствительных пород коллектора и блокировка порового пространства являются серьезными недостатками жидкостей гидроразрыва на водной основе [Mojid и др., 2021]. Значительные объемы пресной воды, необходимые для операций ГРП, делают данную технологию экологически расточительной и непрактичной в засушливых регионах планеты. Перечисленные недостатки делают применение водных жидкостей гидроразрыва проблематичным [Zhang и др., 2018].

Несмотря на высокую стоимость и риски, жидкости на основе углеводородов все еще используются в водочувствительных пластах, а также для предотвращения износа скважинного оборудования [Perfetto и др., 2013]. Широкое применение нашли гелеобразные или сшитые системы на основе нефти или дизельного топлива [Robert L. Horton, 2010].

Пены представляют собой структурированные двухфазные жидкости, которые образуются, когда большой объем внутренней фазы (обычно от 55 до 95%) диспергируется в жидкой фазе. Эти жидкости очень универсальны благодаря низкой плотности и высокой вязкости. По мнению авторов [Gupta, 2009; Komar, Yost, Sinclair, 1979], использование пены в качестве жидкости гидроразрыва выглядит предпочтительнее традиционных жидкостей

на водной основе. Расширение газовой фазы после операции ГРП также помогает извлекать жидкую фазу пены [Edrisi, Kam, 2012].

Использование сжиженного нефтяного газа в качестве жидкости гидроразрыва изначально было предложено для традиционных резервуаров, а после было адаптировано для нетрадиционных резервуаров [Hou и др., 2013]. Сжиженный газ является распространенным побочным продуктом газовой промышленности и хранится при температуре окружающей среды. В гелеобразном состоянии сжиженному нефтяному газу характерна стабильная вязкость, а также данный агент не требует специального оборудования для охлаждения или вентиляции. Использование сжиженного нефтяного газа также сокращает необходимость в после операционном сжигании продуктов распада жидкости ГРП, сокращая выбросы CO_2. Основным недостатком этой технологии является то, что она предполагает манипулирование большим количеством легковоспламеняющегося пропана, что небезопасно.

В 2012 году была предложена технология кислотного гидроразрыва пласта для карбонатных или карбонат-содержащих коллекторов, которым свойственны высокая температура, высокое давление в трещинах, высокое трение потока и сильная неоднородность коллектора. В отличие от расклинивающего механизма образования трещины гидроразрыва, кислота используется для частичного растворения карбонатной компоненты горной породы с формированием каналов, которые образуют стенки трещины [Li и др., 2012]. Краткое описание методов стимуляции кислотной обработкой в нефтяных и газовых сланцах представлено в [Li и др., 2016].

Для водочувствительных пластов, наилучшим решением могут стать неводные метанольные жидкости. Метанол обладает такими прекрасными свойствами, как высокая растворимость в воде, низкое поверхностное натяжение и высокое давление паров. На протяжении многих лет несколько авторов выявляли преимущества жидкостей на спиртовой основе, включая низкую температуру замерзания, низкое поверхностное натяжение, высокую растворимость в воде, высокое давление паров и совместимость с пластом. Это благоприятно сказывается на извлечении жидкости из трещин и пласта и, следовательно, повышает проницаемость газа в обрабатываемой зоне [Hernández, Fernández, Scianca, 1994]. Для увеличения вязкости метанола используется вспенивание или гелирование. С другой стороны, данный агент ГРП является очень опасным в использовании. Температура воспламеняемости метанола составляет 11,6°C, а его плотность больше, чем у воздуха. Во избежание контакта паров метанола с кислородом используется «слой» паров CO_2. Таким образом, значительные затраты на обеспечения необходимой безопасности операций с использованием метанола привели к отказу от

метанола в качестве базовой жидкости и ограничению его использования только в качестве добавки. Метанол в качестве добавки широко используется при гидроразрыве пласта, например, как ингибитор коррозии или накипи, уменьшитель трения и усилитель оттока пластовой воды [Saba и др., 2012].

Также в качестве жидкости для гидроразрыва были разработаны эмульсии –смеси двух или более несмешивающихся жидкостей. Так как в основе эмульсий, как правило, дизельное топливо, то главным преимуществом данных жидкостей является сокращение или полное исключение использования воды в операциях ГРП [Gupta и др., 2007].

В последнее же десятилетие стремительно набирают популярность криогенные жидкости гидроразрыва. CO_2 в качестве агента ГРП был использован в нескольких состояниях: сжиженном, сверхкритическом, вспененном и гибридном – в сочетании с другими жидкостями.

С начала 1960-х годов сжиженный CO_2 используется в операциях ГРП. В самом начале он использовался в качестве добавки к кислотному ГРП для повышения извлечения основной жидкости [Mueller и др., 2012]. Но уже в 1981 году сжиженный CO_2 был использован в качестве самостоятельного агента ГРП [Sinal, Lancaster, 1987]. При проведении полевых операций CO_2 хранится в резервуаре при давлении 2,0 МПа и температуре -35°C. После добавления проппантов давление в резервуаре повышают до 35–40 МПа. По мере закачивания CO_2 в пласт, температура повышается до температуры забоя скважины. Во время промывки скважины (flowback) давление снижается, и CO_2 выходит на поверхность в виде газа.

Помимо таких положительных качеств CO_2 как отсутствие негативного воздействия на поровое пространство и отсутствие набухания глинистой компоненты, данному агенту ГРП также характерна значительная адсорбция сланцем, превышающая адсорбцию сланцем метана (CH_4). Таким образом, CO_2 способен заменить CH_4 в сланцевой формации, оставаясь удержанным под землей, и увеличить добычу газа. Данная особенность позволяет предположить, что повышенная адсорбция сланцевой породой CO_2 из сланцевого газа может служить многообещающим средством сокращения выбросов CO_2 при добыче сланцевого газа. Кроме того, данная технология потенциально может быть использована для захоронения атмосферного CO_2.

Стоит отметить, что за счет того, что энергия, вырабатываемая CO2, приводит к удалению всей остаточной жидкости, оставшейся в пласте, призабойная зона не требует тщательной очистки, и приток может быть вызван практически сразу. Разгазирование CO_2 также способствует подъему пластовых флюидов во время операции очистки. Кроме того, CO_2 создает более сложные сети трещин из-за ее более низкой вязкости.

Азот также является популярным криогенным агентом гидроразрыва. Как правило, газообразный азот смешан с другими жидкостями в виде взвеси (смеси, состоящие из азота (> 95%) и жидкой фазы), пены (смеси, состоящие из азота (50–95%) и жидкой фазы) или активированными жидкостями (смеси, состоящие из азота (5%–50%)) [Rowan, 2009].

Чистый азот используется в качестве агента ГРП в сланцевых пластах по двум основным причинам: (1) пласт находится под давлением и (2) сланцевые породы чувствительны к водным компонентам. Обеспечивая больше энергии для вытеснения любой жидкости из процесса гидроразрыва пласта или коллектора из ствола скважины, азот способствует извлечению жидкости.

Теоретически самоподдерживающиеся трещины могут образовываться в результате теплового удара при контакте закачиваемой чрезвычайно холодной жидкости теплого пласта. В случае закачки жидкого азота тепловое напряжение играет значительную роль в снижении давления инициации трещины гидроразрыва и ее распространения, создавая чрезвычайно высокое растягивающее напряжение и вызывая обширные повреждения породы [Cha и др., 2014]. Чрезвычайно низкая температура жидкости (от -184°C до -195°C) вызовет термические растягивающие напряжения на поверхности трещины. Эти напряжения превышают предел прочности породы на растяжение, что приводит к фрагментации поверхности трещины. Когда жидкость нагревается до температуры пласта, ее расширение из жидкого состояния в газообразное приводит к приблизительно восьмикратному увеличению расхода [Grundmann и др., 1998]. Стоит отметить, что азот может быть получена непосредственно путем отделения и сжатия газообразного азота из воздуха, что сводит к минимуму затраты на транспортировку жидкости [Wang и др., 2016].

Последние экспериментальные работы в основном сосредоточены на лабораторных исследованиях гидроразрыву пласта с использованием перспективных безводных жидкостей, таких как сжиженные и сверхкритические газы. Было подтверждено, что в случае закачки жидкого азота тепловое напряжение играет значительную роль в снижении давления зарождения и распространения трещины, создавая чрезвычайно высокое растягивающее напряжение и вызывая обширные повреждения породы [Yang и др., 2021b]. Закачка сверхкритического диоксида углерода (CO_2) демонстрирует сильный температурный градиент, создавая локальное растягивающее напряжение в породах, окружающих скважину [Tao и др., 2021]. Основываясь на результатах экспериментальных исследований, криогенный разрыв пласта с использованием жидкого азота продемонстрирован как технология стимуляции пласта без повреждений, которая может

эффективно генерировать трещины в сланцевых и песчаниковых породах-коллекторах [Wang и др., 2016].

Кроме того, жидкости гидроразрыва должны характеризоваться достаточной вязкостью и эластичностью, чтобы хорошо удерживать и транспортировать расклинивающий агент (проппант) в создаваемую сеть трещин [Магадова, Силин, Глущенко, 2012].

Важно подчеркнуть, что каждый нетрадиционный пласт уникален и имеет свои свойства проницаемости, состав и пластовое давление, что требует индивидуального проектирования процедуры ГРП. Например, технология многостадийного ГРП, широко применяемая при разработке американской формации Баккен, не применима для Баженовской формации [Bukharov и др., 2020], в связи с тем, что жидкости на водной основе могут вызвать ряд негативных последствий, таких как закупорка порового пространства, изменение смачиваемости, дестабилизация глины и образование эмульсии. Эти агенты считаются типичными для традиционных пластов, однако для Баженовской свиты это может оказаться критичным из-за крайне низких значений пористости и проницаемости матрицы пласта [Bukharov и др., 2020].

На практике при разработке сланцев используется широкий спектр жидкостей: от смеси CO_2 и азота (без проппанта) до гибридных систем. Согласно [King, 2010], оптимальный выбор жидкости гидроразрыва и фракций расклинивающего агента, а также его концентрация определяются хрупкостью соответствующих пород (Рисунок 4).

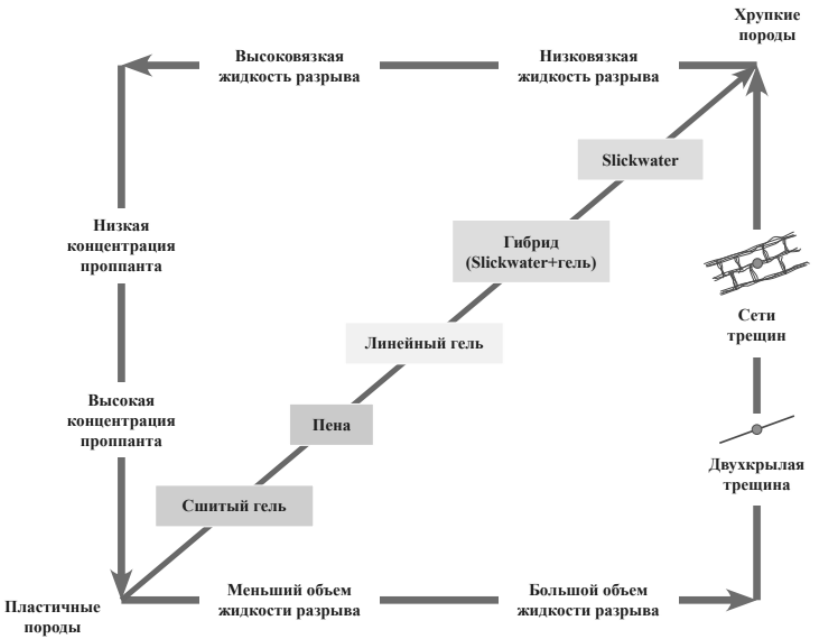


Рисунок 4. Упрощенная схема зависимости между хрупкостью породы и составами жидкости для гидроразрыва пласта [Qui, Yakushev, 2016].

1.3 Акустическая эмиссия (АЭ)

Микросейсмический мониторинг является ценным инструментом для оценки эффективности выполненной операции ГРП. Местоположение микросейсмических событий с достаточным разрешением предоставляет информацию о геометрии трещин. Кроме того, микросейсмический мониторинг используется для отображения пространственных и временных изменений сети трещин в режиме реального времени. Однако эта технология зачастую является дорогостоящей, а ее точность часто недостаточна для локализации сложных сетей трещин. Из-за этих недостатков микросейсмические данные не могут точно отразить фактическое состояние распространения гидравлических трещин. Поэтому для отслеживания и проверки инициации и распространения гидравлических трещин требуются дополнительные данные [Zhao и др., 2022].

Акустическая эмиссия (АЭ), применяемая в лабораторных условиях, считается высокочастотным аналогом микросейсмичности, предоставляющая дополнительную информацию о процессе разрушения трещин гидроразрыва. Предыдущие исследования показали, что динамику процесса ГРП можно оценить по изменению механических параметров и по пространственно-временному распределению событий АЭ. Метод АЭ очень полезен для лабораторных исследований зарождения и раннего распространения трещин в образцах горных пород с помощью выявления предвестников разрушений [Dotsenko и др., 2018; Huang, Li, 2015; Stanchits и др., 2014; Wasantha и др., 2015; Zhu и др., 2017]. В работах [Kartseva и др., 2022; Smirnov и др., 2020] были исследованы эффекты закачки жидкости в сухие и насыщенные образцы. В сухих образцах временная задержка активации АЭ соответствует времени распространения фронта жидкости. При ступенчатом повышении порового давления в насыщенных образцах отклик АЭ регистрируется с задержкой после инициирующего давления. Мониторинг АЭ также является ценным инструментом для контроля роста трещин на постпиковой стадии развития [Chen, Nagaya, Ishida, 2015]. Кроме того, местоположение и характеристики трещины анализируются путем определения местоположения и механизма источника событий АЭ [Li, Gonçalves da Silva, Einstein, 2019; Zhai и др., 2020]. Метод инверсии тензора моментов (Moment Tensor Inversion (MTI)) позволяет прогнозировать поведение трещин и развитие напряженного состояния в пласте. Кроме того, расположение акустических событий хорошо согласуется с расположением макроскопических гидравлических трещин. Таким образом, лабораторные исследования ГРП имеют некоторые сходства и преимущества перед микросейсмичностью, и, потенциально, они могут повысить эффективность полевых работ.

1.4 Лабораторные исследования гидроразрыва

Многочисленные исследования были проведены в попытке выявить закономерности изменения параметров трещины гидроразрыва и подтвердить

соответствующие концепции. Для моделирования пластовых условий при инициации трещины гидроразрыва были разработаны различные экспериментальные установки. Их можно разделить на три основные категории в зависимости от режима нагружения: (1) одноосные, (2) псевдо-трехосные и (3) истинно трехосные [Qian и др., 2020].

Одноосная экспериментальная установка прикладывает силу только в одном направлении (например, осевом) к образцу, что вызывает случайное распространение гидравлических трещин в плоскости, перпендикулярной направлению нагружения [Li, Gonçalves da Silva, Einstein, 2019]. Псевдо-трехосная экспериментальная установка прикладывает осевые и радиальные напряжения к цилиндрическому образцу (два из трех главных напряжений равны) [Zhuang и др., 2019]. Испытания в псевдо-трехосной установке могут проходить по двум основным схемам: схема Беккера – $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ и схема Кармана $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Истинно трехосная установка позволяет создать три независимых ортогональных нагрузки различной величины и наиболее точно смоделировать естественное напряженное состояние для призматического или кубического образа [Stanchits и др., 2014; Карев и др., 2022; Патутин, Рыбалкин, Дробчик, 2021]. Кроме того, все экспериментальные установки могут быть оснащены системой измерения объема образца, акустическими датчиками [Oye и др., 2022] и системой цифровой корреляции изображений (Digital Image Correlation) [Yang и др., 2021a].

На сложный процесс гидроразрыва, в котором задействованы четыре типа механики, оказывают влияние многочисленные факторы. Влияние наименьшего главного напряжения обсуждалось в [Guo, Morgenstern, Scott, 1993], [Moreno и др., 2011]. Варианты возможной зависимости давления разрушения от скорости опрессовки скважины [Zoback и др., 1977] и скорости закачки на распространение трещины были рассмотрены в [Guo, Morgenstern, Scott, 1993]. В работе были освещены аспекты циклической закачки перед разрушением при гидроразрыве пласта в условиях трехосного напряжения, такие как снижение давления разрушения и увеличение повреждений вокруг гидроразрыва [Patel, Sondergeld, Rai, 2017]. Авторы исследования [Liu и др., 2022] показали, как продолжительность цикла и скорость закачки оказывают различное влияние на параметры гидроразрыва. Частое изменение давления закачки стимулирует развитие микротрещин и создает сложную и короткую сеть трещин. Обсуждалось понимание изменений механических свойств сланцев под воздействием жидкости для гидроразрыва и то, как эти изменения могут повлиять на процесс внедрения проппанта [Akrad, Miskimins, Prasad, 2011]. Исследователи [Коврижных, Барышников, 2021] сопоставили аналитические решения с данными опытов и выявили, что критерии максимального нормального и

касательного напряжений хуже согласуются с экспериментальными результатами, чем теоретические расчеты по критерии предельного пластического сдвига. Была продемонстрирована проводимость нерасширенных естественных трещин, расширенных естественных трещин, расширенных наведенных трещин и расширенных наведенных трещин [Zhang и др., 2014]. Другое исследование посвящено изучению механизмов, ограничивающих рост трещин [Fisher, Warpinski, 2012]. Были исследованы детали возникновения и распространения трещин вблизи ствола скважины [Liang и др., 2017]. Проанализированы зарождение и изменение параметров трещин в лабораторных экспериментах с высоковязкими и низковязкими жидкостями [Chen, Nagaya, Ishida, 2015; Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015]. Изучалось влияние ранее существовавших трещин на ориентацию образующихся трещин [Kolawole, Ispas, 2020; Stoeckhert и др., 2015; Zoback и др., 1977]. Также в лабораторных условиях были рассмотрены закономерности развития трещины гидроразрыва, инициированной в двух пересекающихся скважинах в неоднородном поле напряжений [Патутин, Скулкин, 2023]. Разработкой легкого проппанта для расклинивания созданных трещин гидроразрыва в низкотемпературных угольных пластах для интенсификации дренирования занимались Сердюков и Шилова [Сердюков, Шилова, 2018]. Хотя в нетрадиционных коллекторах было проведено значительное количество экспериментов по гидроразрыву пласта, процесс оптимизации все еще обсуждается из-за сложности, особенно с учетом неоднородности пород [Li и др., 2015].

1.5 Усовершенствованная геотермальная система (Enhanced geothermal system)

Для удовлетворения энергетических потребностей растущего населения планеты разведываются все новые энергетические ресурсы. В связи с этим, помимо традиционных геотермальных ресурсов, была предложена новая область геотермальных систем, известная как усовершенствованные геотермальные системы, использующие геотермальные ресурсы, расположенные глубоко под землей [Tester и др., 2006]. Эти системы ассоциируются с высокотемпературными (температуры около 100–300°C) геологическими образованиями, залегающими на глубинах около 1-4 км, со сверхнизкими характеристики проницаемости [Breede и др., 2013].

Усовершенствованная геотермальная система – это горячий горный массив, который не содержит воды или содержит ее в небольшом количестве. Он обладает полезными геотермальными свойствами и может быть использована для производства электроэнергии и использования горячей воды и является важной частью геотермальных энергетических ресурсов. Представлен данный горный массив, в основном, метаморфической горной породой или магматической горной породой такой как гранит. Для эффективного производства геотермальной энергии необходимо создать сложную сеть

трещин в плотном высокотемпературном горном массиве, чтобы обеспечить достаточные и эффективные каналы теплообмена [Olasolo и др., 2016; Zhang и др., 2019a]. Разветвленная сеть трещин превращает глубоко залегающий низкопористый и низкопроницаемый массив горных пород в относительно высокопроницаемый искусственный геотермальный резервуар посредством гидроразрыва пласта и других методов воздействия на пласт [Zimmermann и др., 2011].

После более чем 40 лет полевых испытаний было подтверждено, что усовершенствованные геотермальные системы могут успешно производить геотермальную энергию из глубоких низкопроницаемых горячих сухих пород посредством гидравлического разрыва пласта, но фундаментальные исследования технологии воздействия на пласт все еще относительно слабы, что серьезно ограничивает эффективную разработку горячих сухих пород как ресурса [Zhu и др., 2015]. Трудности в разработке сохраняются из-за высокой прочности пород целевого горного массива и высокой температуры (>180 °C) [McClure, Horne, 2014]. Технология ГРП с закачкой водных жидкостей демонстрирует высокое давление инициации трещины и склонна к образованию простых двукрылых трещин [Zhou и др., 2020] вместо сложной сети трещин. Поэтому необходимо изучить опыт применения ГРП в нефтегазовой отрасли и предложить новые технологии гидроразрыва пласта, подходящие для разработки данного энергетического ресурса.

1.6 Трещиноватые коллекторы

Как известно, часть запасов углеводородов сосредоточена в трещиноватых коллекторах, которые, как правило, имеют сложную структуру [Pollard, Aydin, 1988]. В отличие от порового типа коллектора, проницаемость трещиноватого типа коллекторов может изменяться в очень значительном диапазоне, что влияет на дебит скважины. По мере изучения таких коллекторов стало очевидно, что не все трещины в пластовых условиях являются флюидопроводящими, что требует разработки более совершенных подходов к изучению проницаемости таких структурных объектов [Zhigulskiy, Lukin, 2019]. Одним из индикаторов трещиноватого коллектора является утечка буровой жидкости. Слишком большое количество бурового раствора теряется в естественных трещинах. Как правило, для борьбы с утечками используются бóльшие объемы бурового раствора и твердые добавки для борьбы с потерей жидкости. Эта стратегия не всегда эффективна и может принести больше вреда, чем пользы [Britt, Hager, Thompson, 1994].

Влияние естественных трещин и естественных пластовых напряжений на инициирование, распространение и ориентацию трещины гидравлического разрыва в пласте остается важной проблемой [Kolawole, Ispas, 2020]. Чтобы оценить объем

простимулированного коллектора и эффективность операции гидроразрыва, необходимо понять, как вызванные гидравлические разрывы взаимодействуют с ранее существовавшими естественными трещинами. Исследователи [Sarmadivaleh, Rasouli, Shihab, 2011] определили четыре основных механизма взаимодействия трещины гидроразрыва и природной трещины: пересечение, задержание, раскрытие и переориентация. Группа ученых [Warpinski, Teufel, 1987] предложили аналитическую модель для оценки того, будет ли ГРП раскрывать естественную трещину или будет активировать сдвиговое проскальзывание. Также был разработан аналитический критерий, который предсказывает, пересечет ли трещина гидроразрыва ортогонально ориентированную естественную трещину [Renshaw, Pollard, 1995]. Многочисленные лабораторные и численные исследования были направлены на экспериментальную оценку критериев взаимодействия искусственно созданной и естественной трещин и разработку более обобщенных подходов также были проведены [Blanton, 1982; Chuprakov, Melchaeva, Prioul, 2014; Dahi-Taleghani, Olson, 2011; Dubinya, Trimonova, Nachev, 2020]. В работе [Жигульский, Тихоцкий, 2020] выполнена оценка напряженно-деформированного состояния трещиноватого массива и проанализировано влияние коэффициента шероховатости трещины. В последние годы многие другие исследователи также экспериментально изучали механизм распространения гидроразрыва в слоистых, трещиноватых и неразрушенных коллекторах [Gale, Reed, Holder, 2014; Wang, Li, 2017; Zhang, Zhang, Sun, 2021].

1.7 Недостатки существующих методов гидроразрыва пласта и постановка задачи исследования

Со времени первой успешной коммерческой реализации ГРП технология претерпела значительные изменения и используется в многочисленных отраслях промышленности. Фундаментальные и лабораторные исследования способствуют к совершенствованию существующих и разработке новых процедур в технологии. Разработаны и усовершенствованы многочисленные жидкости гидроразрыва [Silin и др., 2022; Магадова, Силин, Глущенко, 2012]. Разработаны усовершенствованные испытательные установки для создания соответствующих исследованию условий для изучения поведения трещины гидроразрыва [Qian и др., 2020]. Современные технологии позволяют осуществлять наблюдение за пространственными и временными изменениями сети трещин в режиме реального с использованием микросейсмического мониторинга [Zhao и др., 2022]. Разработаны многочисленные модели роста трещины гидроразрыва, способствующие наиболее эффективному дизайну операций ГРП.

Однако, до сих пор существуют осложнения в операциях гидроразрыва, требующие дополнительного изучения. Так, существующие теоретические модели

распространения ГРП имеют некоторые ограничения в отношении прогнозирования влияния флюидов на свойства пласта, а натурные эксперименты в целевом пласте сложны и дороги. Предварительные лабораторные исследования новых жидкостей гидроразрыва поможет избежать осложнений перед их промышленным применением [Deb и др., 2021]. Кроме того, раскрытие трещины и шероховатость ее поверхности (стенок), способную затруднять доставку проппанта и создавать дополнительное гидравлическое сопротивление, практически невозможно измерить напрямую в резервуаре, в то время как в лаборатории расширение образца можно измерить непосредственно с высокой точностью. В конечном итоге ожидается, что гидравлический разрыв пласта в полевых условиях, основанный на результатах независимых лабораторных экспериментов, будет более эффективным. Лабораторные эксперименты гидроразрыва также полезны для успешного дизайна дорогостоящих и сложных операций гидроразрыва, так как позволяют подобрать условиях распространение трещин в необходимом объеме горной породы, чтобы предотвратить распространение трещин на соседние пласты и избежать обводнения. Таким образом, лабораторные эксперименты являются разумной альтернативой, которая может дать исчерпывающую информацию о динамике и свойствах образовавшихся ГРП до полевого применения определенной технологии ГРП [Rummel, Winter, 1983; Turuntaev и др., 2021].

Физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации в лабораторных масштабах может послужить основой для разработки эффективных и экологичных технологий повышения продуктивности пластов, относящихся к трудноизвлекаемым месторождениям [Карев и др., 2022].

Существующие ранее исследования, целью которых было изучение влияния реологических свойств жидкости гидроразрыва на параметры инициируемой трещины гидроразрыва, были выполнены с использованием только нескольких жидкостей. Данная работа позволит выявить эмпирическим путем зависимости между параметрами инициированной трещины гидроразрыва и вязкостью инициирующей жидкости. В лабораторных экспериментах были использованы как модельные, так и актуальные жидкости гидроразрыва, в настоящее время применяемые в полевых операциях. Важно подчеркнуть, что вязкости закачиваемых жидкостей различаются в значительно широком диапазоне от 0.1 сП до 100 000 сП, что представляет собой наиболее полный набор жидкостей для данного типа экспериментов и получения достоверных корреляций.

Специально разработанная методика мониторинга инициации и распространения трещины гидроразрыва и одновременного измерения параметров трещины, состоящая из трех независимых систем регистрации, позволит получить измерить основные параметры

инициируемой трещины гидроразрыва, достоверность которых подтверждается дублирующими независимыми измерениями.

Сопоставление установленных взаимосвязей для цилиндрических образцов (10×10 см) и для кубических образцов (25 см×25 см) может быть интерпретировано как техника масштабирования. Все полученные зависимости будут получены впервые для исследуемых магматических горных пород и представленного набора жидкостей и могут быть использованы для верификации модели гидроразрыва.

2. Описание измерительного и испытательного оборудования, экспериментальной методики, горных пород и жидкостей гидроразрыва

2.1 Описание измерительного и испытательного оборудования

2.1.1 Псевдо-трехосная система нагружения цилиндрических образцов

Эксперименты гидроразрыва в условиях псевдо-трехосного нагружения осуществляются в камере сервогидравлического пресса производства корпорации Material Testing Systems (MTS 815/S-ATM) (Рисунок 5). Силовая рама с гидравлическим поршнем позволяет создавать осевую (вертикальную) нагрузку до 4600 кН, которая может быть приложена к цилиндрическим образцам диаметром от 30 до 100 миллиметров. Кроме того, в камере установки образцы могут подвергаться боковому (обжимному) или поровому давлению до 140 МПа и нагреву до 110°C. Силовая рама также оснащена внутренним датчиком для измерения нагрузки, приложенной к образцам. В дополнение к датчику нагрузки в комплект оборудования входит ультразвуковая система, измеряющая скорости продольных и поперечных волн в образцах во время эксперимента. Ультразвуковая система позволяет отслеживать изменение анизотропного и неоднородного поля скоростей в образце в течение всего процесса гидроразрыва или разрушения. Жесткость системы закачки жидкости равна 5 МПа/мл и была рассчитана на основе анализа линейной части кривой давления жидкости. Подробности расчета этого параметра представлены в статье [Bobrova и др., 2021].

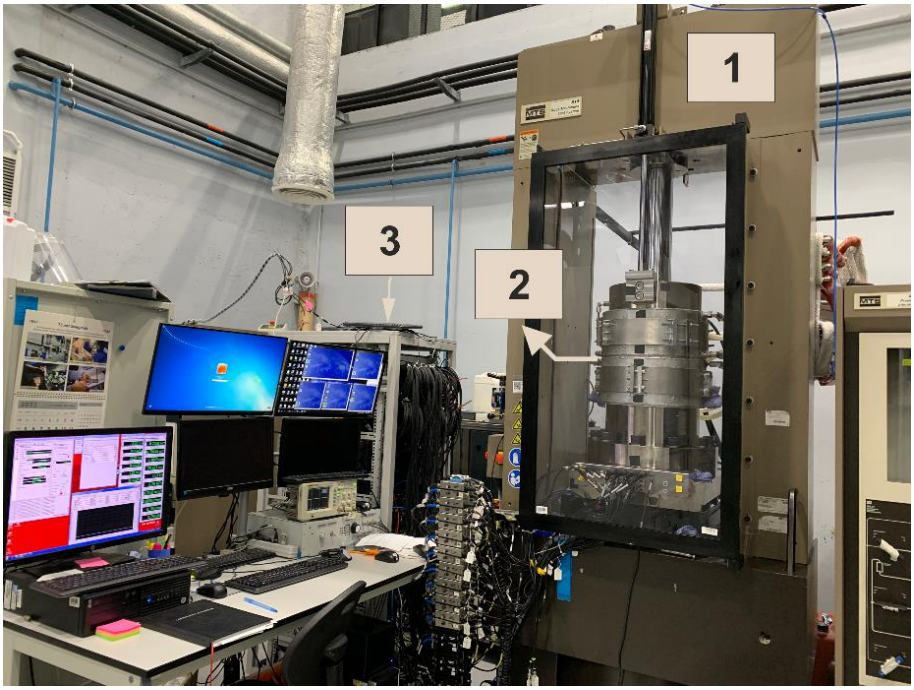


Рисунок 5. Общий вид сервогидравлического пресса MTS 815/S-ATM в лаборатории. 1: Силовая рама с гидравлическим поршнем; 2: Камера высокого давления; 3: Система мониторинга акустической эмиссии Richter.

Деформации образцов, помещенных в камеру пресса MTS 815/S-ATM, измеряются датчиками продольных и поперечных деформаций, установленными непосредственно на цилиндрическую поверхность образцов (Рисунок 6).

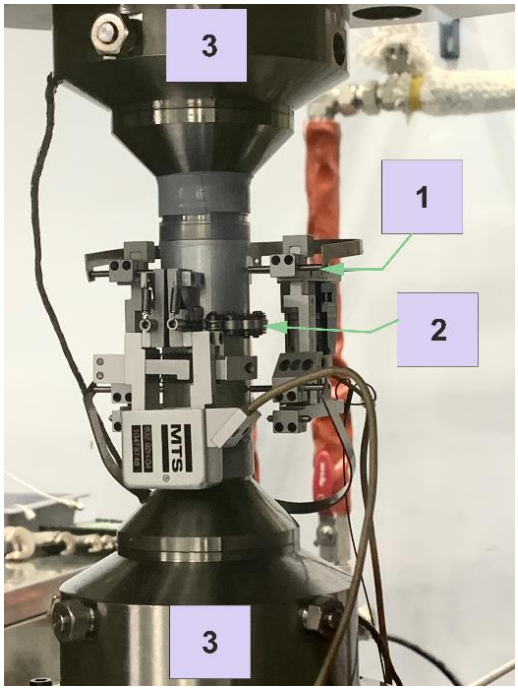


Рисунок 6. Схема установки деформометров продольных (1) и поперечных (2) деформаций, стальных накладок (3) с ультразвуковыми датчиками на образце.

В дополнение к имеющейся ультразвуковой системе, мониторинг динамики процесса разрушения образцов осуществляется с помощью акустической системы Richter, изготовленной Itasca Consulting Group, Inc. (США) (Рисунок 7). Для обработки зарегистрированных во время экспериментов данных Itasca Consulting Group, Inc. (США) также предоставляет программное обеспечение. Акустическая система Richter непрерывно записывает полностью оцифрованные сигналы акустической эмиссии (АЭ), испускаемые микротрещинами во время разрушения образца. Непрерывная запись исключает потерю каких-либо сигналов даже при быстром распространении макроскопического разрушения.

Акустическая эмиссия, изучаемая в лабораторных условиях, считается высокочастотным аналогом микросейсмичности и, следовательно, может дать дополнительную информацию о процессе зарождения и распространения трещин гидроразрыва. Акустическая эмиссия – это генерация упругих волн во время быстрого высвобождения энергии из локализованных источников внутри материала. В качестве источников и механизмов генерации АЭ в горных породах выступают рост или закрытие микро- и макротрещин, схлопывание пор, перемещение и выход на границы зерен дислокаций и их скоплений.

Предыдущие исследования [Goodfellow и др., 2015; Guo и др., 2014; Hu и др., 2019; Jaworski, Duncan, Seed, 1981; Lockner, 1993; Patel, Sondergeld, Rai, 2017; Pater de и др., 1994; Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015; Zhang и др., 2019b; Zoback и др., 1977] показали, что динамику процесса гидроразрыва можно оценить по изменению механических параметров и по пространственно-временному распределению событий АЭ.

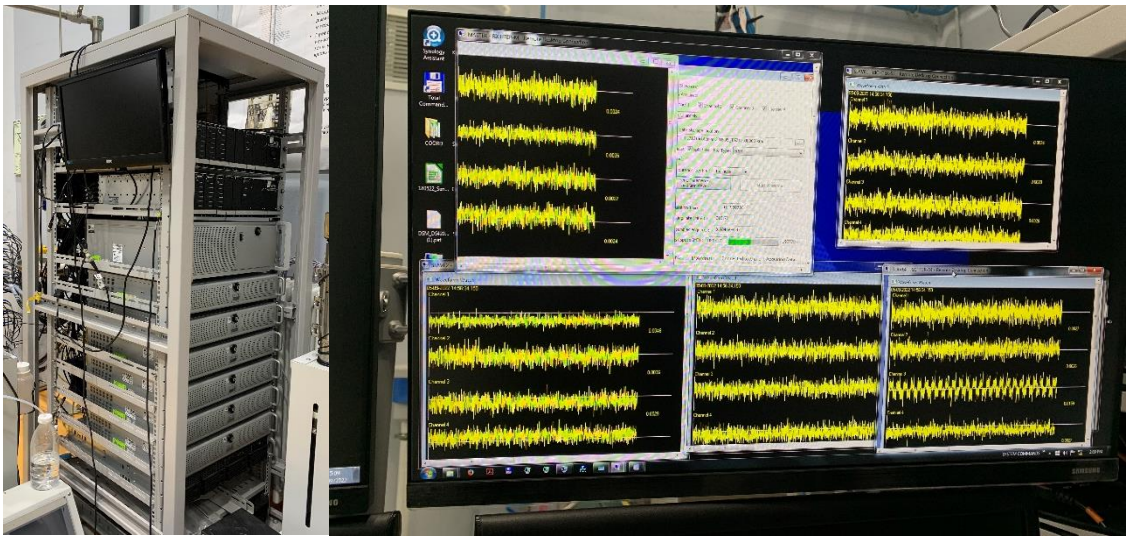
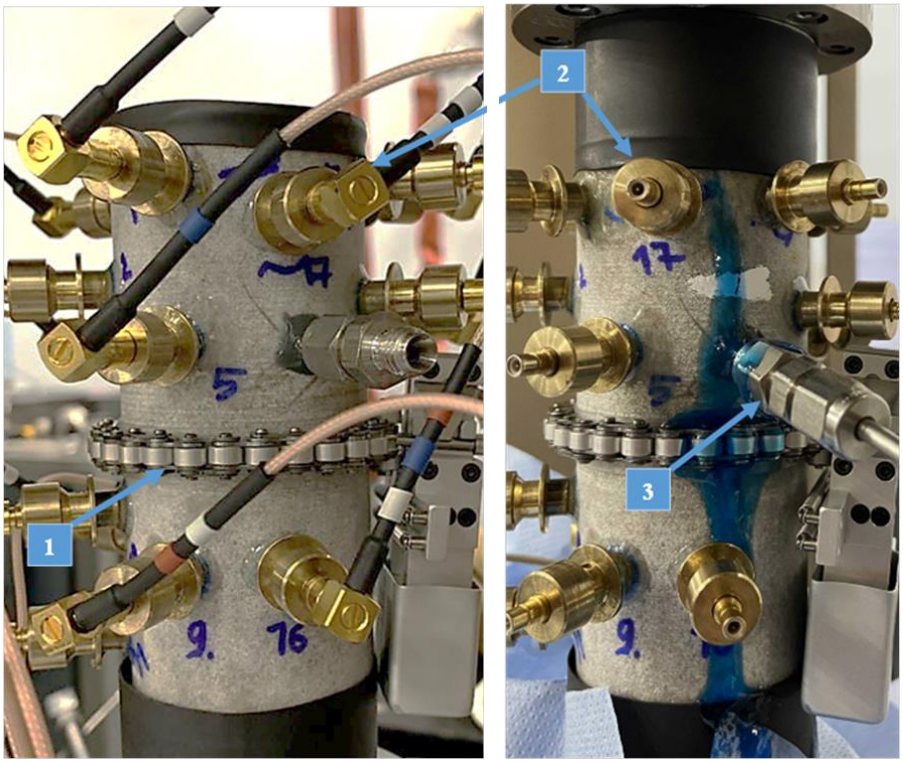


Рисунок 7. Система акустического мониторинга Richter, изготовленная Itasca Consulting Group, Inc. (США).

Запись сигналов акустической эмиссии осуществляется с помощью 18 однокомпонентных пьезоэлектрических датчиков, приклеенных непосредственно к цилиндрической поверхности образца (Рисунок 8). Датчики были специально сконструированы и изготовлены в лаборатории центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий (Сколтех), и могут регистрировать упругие волны при давлении до 140 МПа и температуре до 180°C. Сигналы непрерывно записываются с частотой дискретизации 10 МГц и разрешением 16 бит. Для удаления шума перед дальнейшей обработкой к данным применяется полосовой фильтр с частотой среза 50 кГц (нижняя граница) и 750 кГц (верхняя граница). Резонансная частота преобразователей составляет около 1 МГц. Как только выполняются условия срабатывания полосового фильтра, сигналы АЭ извлекаются из непрерывной записи, и временной ряд из 2048 точек сохраняется для каждого канала сбора данных с целью дальнейшего анализа формы сигнала. Использование 18 датчиков обеспечило достаточный охват образца как для локализации источников излучения, так и для метода инверсии тензора моментов (Moment tensor inversion).

Таким образом, момент регистрации возникновения объёмной деформации образца и инициации сигналов АЭ, как правило, свидетельствуют о моменте зарождения

трещины гидроразрыва. Комбинация всех независимо измеренных параметров позволяет определить момент достижения трещиной гидроразрыва поверхности образца.



(a) **(b)**

Рисунок 8. Образец песчаника с установленным поперечным деформометром (1), датчиками АЭ (2), наклеенными на цилиндрическую поверхность, и трубкой (3), вклеенной в ствол скважины. (a) образец до гидроразрыва; (b) образец после гидроразрыва [Bobrova и др., 2021].

Кроме того, данные пьезоэлектрические датчики для записи событий АЭ позволяют осуществлять ультразвуковое прозвучивание в разных направлениях, но путем подачи электрического импульса амплитудой 450 В на каждый из установленных преобразователей по очереди. Во время излучения ультразвукового импульса одним из датчиков, остальные 17 датчиков действуют как приемники упругих волн, что позволяет измерять скорости P-волн в разных направлениях. Чтобы охарактеризовать анизотропию скорости в неоднородных образцах, применяется модель вертикально-поперечной изотропии (vertical transverse isotropy) скорости P-волны и выполняется прозвучивание в вертикальном (P_V) и в горизонтальном (P_H) направлениях, что обеспечивает наилучшее соответствие между моделируемыми скоростями и скоростями, измеренными вдоль всех трасс прохождения ультразвука с различным наклоном к вертикальной оси образца [Stanchits, Lockner, Ponomarev, 2003]. Скорости прохождения ультразвука в образце периодически измеряются во время эксперимента, а затем полученные скорости используются для вычисления координат гипоцентра зарегистрированных событий АЭ.

Методика автоматической локализации сигналов АЭ для анизотропной модели скорости была подробно описана ранее в статье [Stanchits и др., 2014; Stanchits, Lockner, Ponomarev, 2003; Stanchits, Vinciguerra, Dresen, 2006]. Метод информационного критерия Акаике (Akaike Information Criterion), широко используемый в сейсмологии [Leonard, Kennett, 1999], применяется для автоматического определения моментов первых вступлений сигналов АЭ. Для локализации сигналов АЭ используется симплексный алгоритм (Simplex algorithm) [Nelder, Mead, 1965]. Точность определения местоположения источника АЭ составляет около 5 мм для образцов песчаника, гранита и сланца.

Описанный сервогидравлический пресс MTS 815/S-ATM позволяет проводить лабораторные эксперименты и сопутствующие им измерения динамического модуля Юнга, динамического коэффициента Пуассона в соответствии с требованиями Международного общества горной механики (International Society for Rock Mechanics) и с учетом требований ГОСТ 21153.3-85, раздел №2 «Метод разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующей», ASTM D3967-16 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, ГОСТ 28985–91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии», ГОСТ 21153.7-75 «Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн», ГОСТ 28985–91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии», ГОСТ 21153.7-75 «Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн», ASTM D7012-14, ASTM D 2845-08. Расчет и построение уравнения Кулона и кругов Мора (C, φ) выполняется с учетом ГОСТ 21153.8-88 по результатам экспериментов определения предела прочности горной породы на одноосное растяжение (Бразильский тест), предела прочности горной породы при одноосном сжатии, предела прочности горной породы при одностадийном и многостадийном объемном сжатии в термобарических условиях на стандартных и полноразмерных образцов керна.

2.1.2 Истинно трехосная система нагружения кубических образцов

Лабораторные эксперименты гидроразрыва в условиях истинно трехосного нагружения в кубических образцах (250 мм×250 мм ×250 мм) осуществляются в ячейке пресса, который был спроектирован, разработан и изготовлен компанией ООО «Геологика» (Россия). Данный истинно трехосный пресс в настоящее время не имеет аналогов в Российской Федерации и обладает рядом преимуществ. В отличие от псевдо-трехосной системы нагружения MTS 815/S-ATM, в которой равны два из трех главных напряжений, приложенные к цилиндрическому образцу, в истинно трехосной системе нагружения все три главных напряжения создаются совершенно независимо и могут принимать любые

значения в диапазоне до 25 МПа. Таким образом, истинно трехосный пресс позволяет воссоздать естественное напряженно-деформированное состояние горного массива с приложением соответствующих значений горного и боковых давлений к граням кубического образца. К тому же, на образцах цилиндрической формы возможно установить только 18 пьезоэлектрических датчиков для мониторинга АЭ, в то время, как на образцах кубической формы используется 24 датчика для мониторинга АЭ, что позволяет повысить чувствительность системы регистрации и более детально исследовать динамику роста трещины гидроразрыва и воссоздать её форму во времени. Кроме того, максимально допустимый диаметр цилиндрического образца равен 100 мм, в то время как максимально допустимая длина грани кубического образца равна 250 мм. Увеличение размера образца позволяет детальнее изучить динамику распространения и параметры трещины гидроразрыва и исследовать масштабный эффект в горных породах.

Рисунок 9a демонстрирует общий вид истинно трехосной системы нагружения, смонтированной и запущенной в эксплуатацию в лаборатории центра добычи углеводородов Сколтеха. Рисунок 9b демонстрирует фотографию загрузки кубического образца в установку истинно трехосного нагружения.

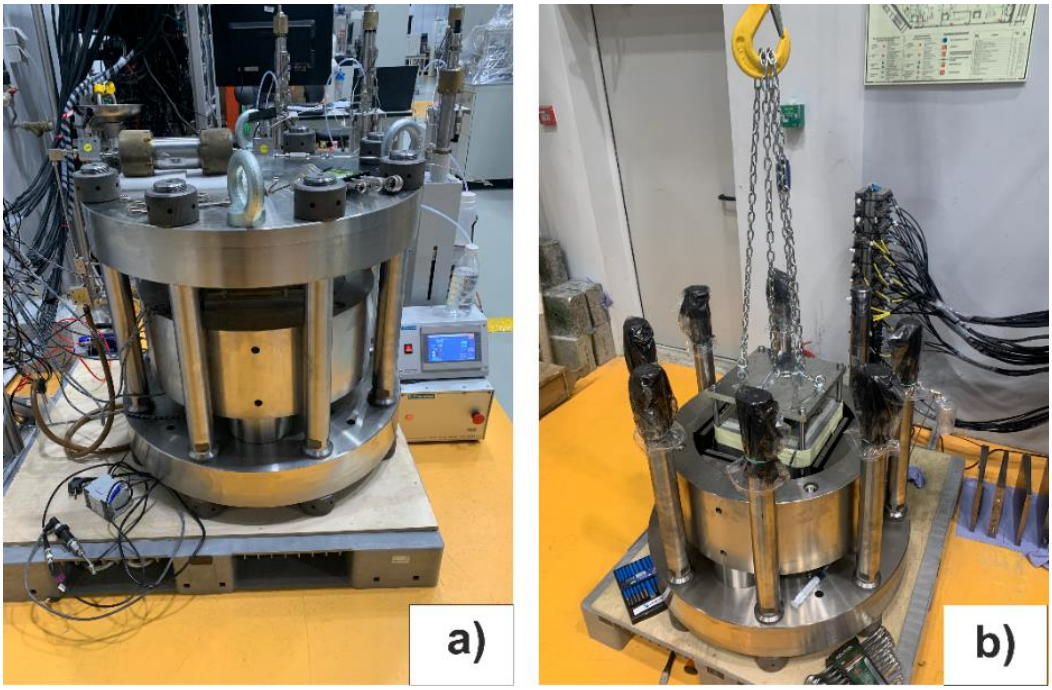


Рисунок 9. a): Фотография установки истинно трехосного нагружения; b) Фотография загрузки блока кубической формы в установку истинно трехосного нагружения.

В дополнение ко всему изложенному, шесть плоских домкратов, установленных по шести граням кубического образца, позволяют не только создавать постоянные нагрузки, приложенные к образцу, но также измерять деформацию образца в каждом направлении, что позволяет определять как направление, так и величину раскрытия трещины гидроразрыва. Момент регистрации возникновения объёмной деформации образца и

инициации сигналов АЭ, как правило, свидетельствуют о моменте зарождения трещины гидроразрыва, а комбинация всех независимо измеренных параметров позволяет определить момент достижения трещиной гидроразрыва поверхности исследуемого образца. Таким образом, выполненные на кубических образцах эксперименты в условиях истинно трехосного нагружения позволяют зарегистрировать все параметры трещины гидроразрыва, полученные на цилиндрических образцах в условиях псевдо-трехосного нагружения. Жесткость системы закачки жидкости равна 10 МПа/мл и была рассчитана на основе анализа линейной части кривой давления жидкости. Подробности расчета этого параметра представлены в статье [Bobrova и др., 2021].

2.2 Описание методик подготовки образцов, проведения экспериментов и расчетов параметров трещины

2.2.1 Методика изготовления и подготовки цилиндрических образцов к эксперименту

Подготовка цилиндрического образца начинается с выбуривания образца нужного диаметра (Ø30 мм для стандартных геомеханических испытаний, Ø50 мм, 80 мм и 100 мм для целевых экспериментов гидроразрыва) из блока или керна горной породы. Затем торцевые поверхности цилиндрического образца шлифуются с помощью алмазного шлифовального круга до максимального отклонения плоскостности не более чем на 0,03 мм.

Для имитации ствола скважины в образце диаметром 50 мм с верхнего торца или с боковой поверхности выбуривается цилиндрическое отверстие к геометрическому центру образца с размерами Ø6 мм × 3,0 мм и в образце диаметром 80 мм – 100 мм выбуривается цилиндрическое отверстие Ø8 мм × 6 мм. Отверстие может быть ориентировано как горизонтально, так и вертикально, в зависимости от особенностей образца (наличия слоистости, трещиноватости) и применяемой в эксперименте схемы нагружения. На боковой поверхности отверстия с отступом на 4-5 мм ото дна также выполняется предварительный надрез (notch) радиальной или вертикальной формы. Глубина надреза в горную породу составляет 2-3 мм. Надрез является концентратором напряжения и ориентирует трещину в нужном направлении. Так как буровые работы выполнялись с водным охлаждением, то далее образец помещается в сушильный шкаф на 8-10 часов при достаточно щадящей температуре, не превышающей 80-100°C. Следующим этапом, на дно отверстия помещается 0.1-0.2 мл двухкомпонентного эластичного клея, чтобы, застыв, он нивелировал влияние концентратора, возникшего как след от коронки при выбуривании отверстия. Полное застывание двухкомпонентного эластичного клея происходит за 8 часов при комнатной температуре. Далее в сухой образец с помощью двухкомпонентного эластичного клея вклеивается металлическая трубка, имитирующая обсадку скважины,

таким образом, чтобы самая глубокая часть отверстия, длиной 5-10 мм ото дна, оставалась открытой (необсаженной). После этого образец оставляют при комнатной температуре на 8-10 часов до полного застывания клея. Далее цилиндрический образец с вклеенной трубкой помещается в непроницаемый термоусаживаемый кожух, который служит изоляцией образца исследуемой горной породы от минерального масла, создающего обжимную (боковую) нагрузку в камере псевдо-трехосного пресса MTS 815/S-ATM.

Следующим шагом подготовки является установка пьезоэлектрических датчиков на цилиндрическую поверхность образца. Для этого в непроницаемом кожухе вырезаются отверстия согласно схеме размещения датчиков (Рисунок 10), и датчики акустической эмиссии (АЭ) приклеиваются непосредственно к образцу с помощью двухкомпонентного эластичного клея. Данные датчики могут регистрировать упругие волны при давлении до 140 МПа и температуре до 180°C.

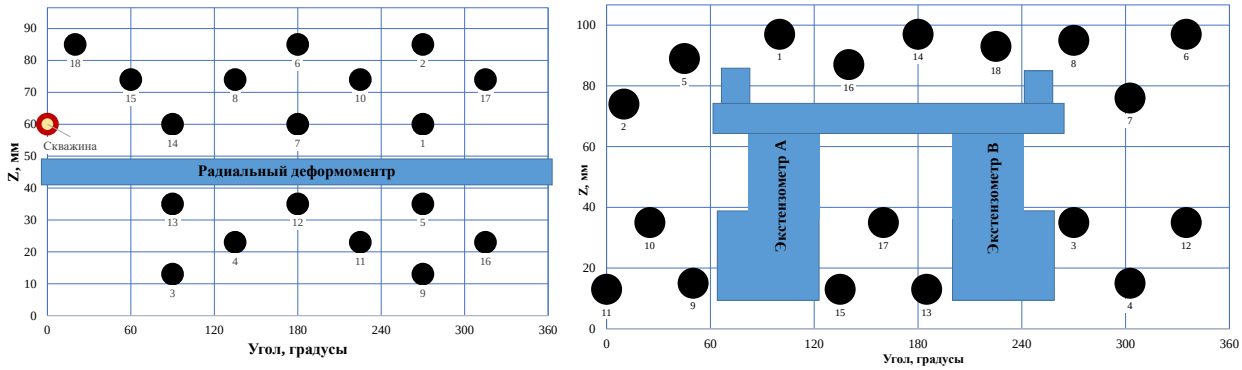


Рисунок 10. Схема размещения 18 датчиков АЭ. Образец с горизонтальной трубкой (слева) и образец с вертикальной трубкой (справа): черный круг – датчик АЭ.

Затем на образец устанавливается датчик для измерения деформации образца (экстензометр), в зависимости от применяемой в эксперименте схемы нагружения. При инициации горизонтально ориентированной трещины гидроразрыва, трещина раскрывается в вертикальном (осевом) направлении (Рисунок 11a), и в эксперименте используется датчик продольной деформации, состоящий из двух пар игл, устанавливаемых диаметрально противоположно на цилиндрической поверхности образца (Рисунок 12a). При инициации вертикально ориентированной трещины гидроразрыва (Рисунок 11b), трещина раскрывается в горизонтальном направлении, и в эксперименте используется цепной датчик для измерения поперечной (радиальной) деформации, устанавливаемый в средней части образца. Он состоит из роликовой цепи, которая опоясывает образец, и зажимного датчика, прикрепленного к концам цепи (Рисунок 12b).

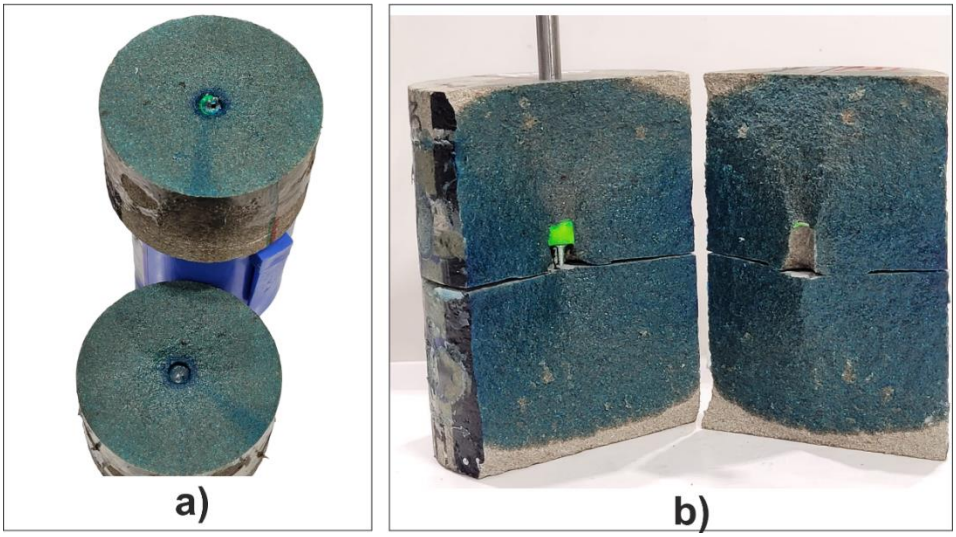


Рисунок 11. Образцы песчаника с вертикальной скважиной после эксперимента лабораторного гидроразрыва: **a)** с горизонтальной трещиной и **b)** с вертикальной трещиной.

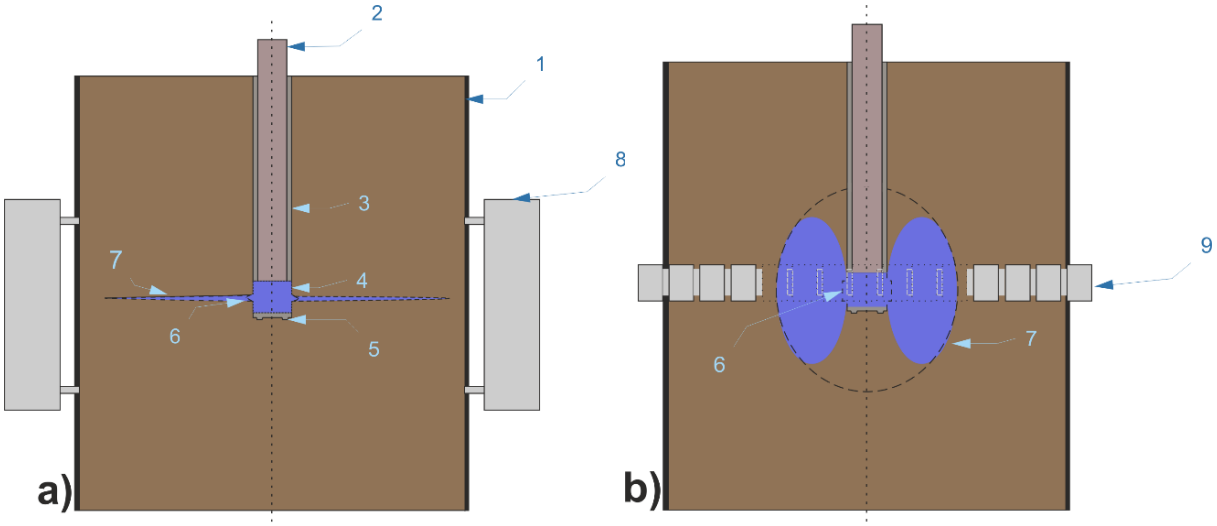


Рисунок 12. Схематическое изображение подготовленного к испытанию образца с вертикальной скважиной в разрезе **(a)** с горизонтальной трещиной и **(b)** с вертикальной трещиной: 1 – цилиндрический образец в непроницаемом кожухе, 2 – вклеенная трубка (обсаженный участок скважины), 3 – двухкомпонентный эластичный эпоксидный клей, на который вклеена трубка, 4 – открытая секция скважины (необсаженный участок), 5 – «залеченные» двухкомпонентным эластичным эпоксидным клеем концентраторы, возникшие из-за выбуривания скважины, 6 – надрез (notch), 7 – инициированная трещина гидроразрыва, 8 – деформометр для измерения осевой деформации, вызванной распространением трещины гидроразрыва, 9 – деформометр для измерения радиальной деформации, вызванной распространением трещины гидроразрыва.

Давление закачиваемой жидкости измеряется датчиком давления, установленным вблизи нагнетательной скважины, и регистрируется одним из каналов системы записи сигналов акустической эмиссии для обеспечения точной синхронизации давления жидкости с записанными акустическими сигналами.

После установки деформометра и акустических датчиков образец помещается между верхним и нижним плунжерами пресса для лабораторного эксперимента.

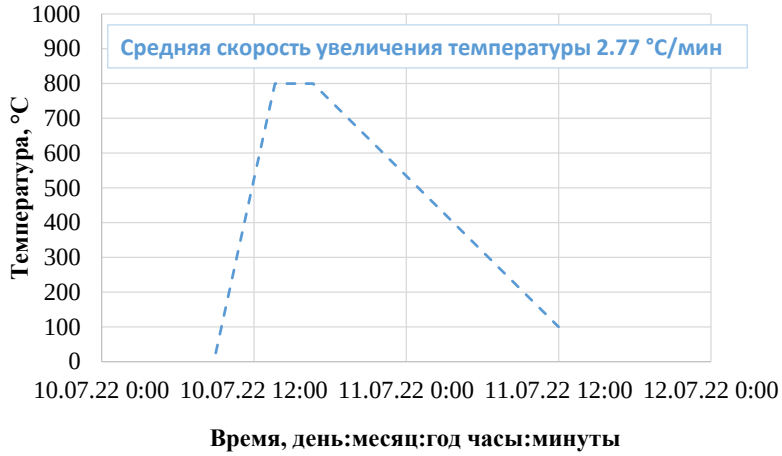
Методика насыщения цилиндрических образцов в камере псевдо-трехосной установки MTS 815/S-ATM

Насыщение образцов для экспериментов гидроразрыва невозможно было выполнить в отдельном сатураторе из-за нестандартных размеров образцов, превышающих Ø30 мм×60 мм. Поэтому насыщение образцов проводилось непосредственно перед экспериментом гидроразрыва в камере псевдо-трехосной установки. Сначала к исследуемому образцу прикладывалась осевая нагрузка 2 кН, из образца откачивался воздух при создании вакуума в течение 1 часа, затем к нижнему торцу образца прикладывалось постоянное поровое давление 1 МПа, благодаря чему фронт насыщения распространялся снизу вверх (по созданному градиенту давления). В образец закачивалось два поровых объема жидкости насыщения. Процесс насыщения контролировался по измерениям скорости продольных волн вдоль трасс, параллельных торцу образца. В качестве жидкости для насыщения образцов использовалось минеральное масло Multitherm PG-1 (вязкость 46 сП), основными преимуществами которого является хорошая изученность физических свойств [Non-Toxic Heat Transfer Fluid MultiTherm PG-1. Phisical properties, 2018] и отсутствие неблагоприятных эффектов таких как набухание.

Методика высокотемпературного нагрева образцов.

Высокотемпературный (800°C) нагрев использовался для создания плотной сети трещин в образцах Ташмурунского гранита. На основании публикации [Chen, Yang, Wang, 2017] известно, что развитие межзерновых и внутризерновых трещин начинается вследствие α-β трансформации зерен кварца при температуре превышающей 573°C. В работе [Li и др., 2020] было показано, что выбор постоянной скорости нагрева менее 5°C/мин позволяет избежать возможного теплового шока породы.

Перед проведением экспериментов гидроразрыва подготовленные цилиндрические образцы Ташмурунского гранита с выбуренным отверстием были нагреты до 800°C с постоянной скоростью нагрева 2,77°C/мин (Рисунок 13a). Затем образцы выдерживались при заданной температуре (800°C) в течение 3 часов, после выключения печи медленно охлаждались до комнатной температуры естественным путем. Для нагрева образцов использовалась высокоточная электрическая муфельная печь SNOL 30/1300 с волокнистой теплоизоляцией (Рисунок 13b).



(**a**) (**b**)

Рисунок 13. (**a**) График истории нагрева образцов Ташмурунского гранита; (**b**) Камера высокоточной электрической муфельной печи SNOL 30/1300.

Дальнейшая процедура подготовки остывших до комнатной температуры образцов к эксперименту гидроразрыва была аналогичной описанной ранее.

2.2.2 Экспериментальная методика (псевдо-трехосные условия нагружения)

К образцу, помещенному в камеру сервогидравлического пресса, прикладывается вертикальная (осевая) нагрузка, равная 2 кН. Далее акустические датчики подключались к системе акустического мониторинга Richter. После проверки качества соединения датчиков АЭ, камера опускается и заполняется минеральным маслом Multitherm PG-1, которое далее создает необходимое для эксперимента боковое (обжимное) давление, приложенное к цилиндрической поверхности образца. Стоит отметить, что образец помещен в непроницаемый кожух, чтобы минеральное масло не насыщало образец. Для насыщения образца в камере псевдо-трехосной установки используется отдельная поровая линия, подведенная к нижнему торцу образца. Подробно процедура насыщения описана ранее. Далее создается необходимая в зависимости от применяемой в эксперименте схемы нагружения (Рисунок 14) положительная (если σ_1 приложено вертикально) или отрицательная (если σ_3 приложено вертикально) вертикальная (осевая) нагрузка, с помощью перемещения поршня. На этапе повышения бокового (обжимного) давления в образце осуществляется периодическое прозвучивание образца. Кондиционное давление рассчитывалось по формуле гидростатического давления с последующей калибровкой расчетов на основе измерений давления в реальном пласте. Образцы сланцев и песчаников подвергались гидравлическому разрыву в камере псевдо-трехосного пресса MTS 815/S-ATM в условиях, соответствующих пластовым условиях. Вертикальное (литостатическое)

напряжение определялось путем интегрирования плотности по глубине с использованием кривой логарифма плотности:

$$\sigma_V = \int_0^z \rho(z)\mathrm{g}\mathrm{d}z = \bar{\rho}gz, \quad (6)$$

где σ_V – вертикальное (литостатическое) напряжение, МПа; ρ – объемная плотность, г/см^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; z – глубина, м; $\bar{\rho}$ – средняя объемная плотность на глубине z, г/см^3.

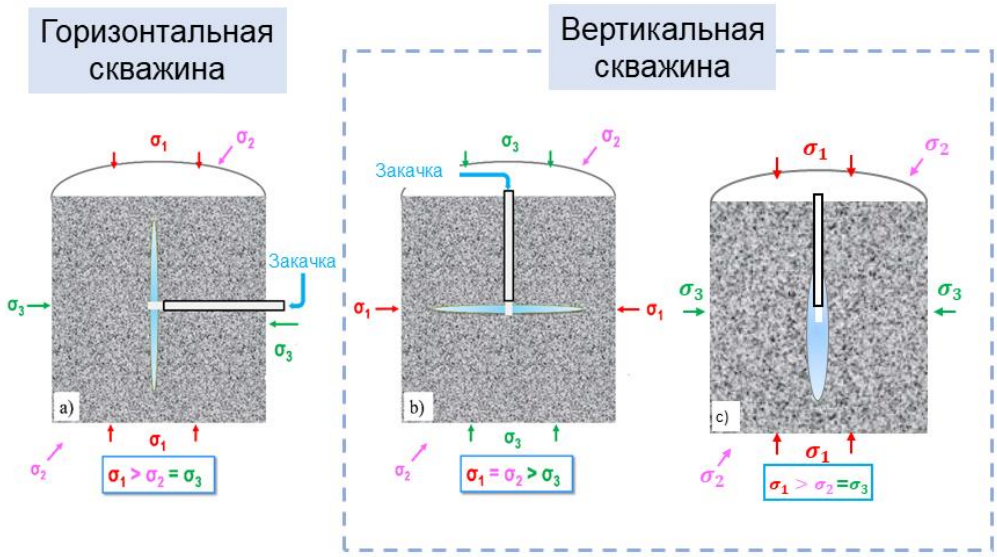


Рисунок 14. Схема нагружения образцов и соответствующая ей ориентация трещины гидроразрыва.

После приложения необходимых нагрузок к цилиндрическому образцу (Таблица 1) образец выстаивается в камере около 90 минут. Потом выполняется ультразвуковое прозвучивание образца непосредственно перед началом эксперимента гидроразрыва. Далее запускается система мониторинга акустических событий. После этого начинается закачка жидкости гидроразрыва в образец со скоростью 5 мл/мин. После эксперимента, происходит постепенный сброс вертикального давления, а потом радиального (разгрузка образца).

Таблица 1. Условия эксперимента лабораторного гидроразрыва.

Горная порода, из которой был выполнен образец	σ_1, МПа	σ_2, МПа	σ_3, МПа	Ориентация трещины	Скорость закачки жидкости, мл/мин
Сланец	54	27	27	вертикальная	5
Песчаник	23	23	8	горизонтальная	5
Покостовский гранит	37	37	23	горизонтальная	5
Покостовский гранит	23	23	8	горизонтальная	5
Ташмурунский гранит	23	23	8	горизонтальная	5
Ташмурунский гранит (нагретый)	23	23	8	горизонтальная	5

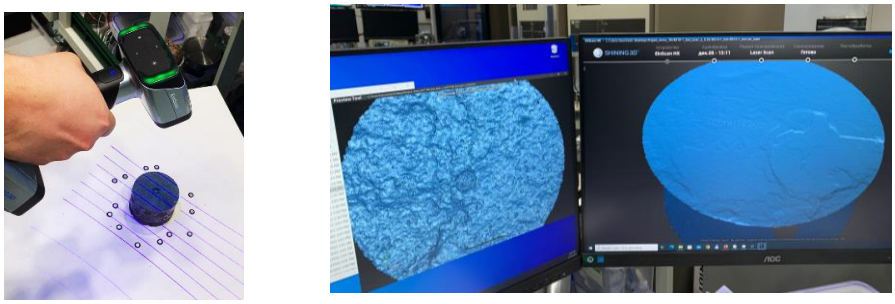
Методика компьютерной томографии образцов

Компьютерный томограф phoenix v|tome|x L 240 (Рисунок 15), установленный в лаборатории центра добычи углеводородов Сколтеха, позволяет получить 3D реконструкцию образца горной породы и оценить параметры, необходимые для эффективного проектирования разработки месторождений, посредством прохождения неразрушающих рентгеновских лучей. В наших исследованиях компьютерная томография использовалась для реконструкции 3D модели поверхности (стенок) трещины гидроразрыва. Испытанный цилиндрический образец помещается полностью в установку и сканируется с разрешающей точностью съемки 0,06 мм.

Рисунок 15. Внешний вид системы компьютерной томографии phoenix v|tome|x L 240.

Методика лазерного сканирования образцов

Ручного 3D-сканер EinScan HX (Shining 3D) также использовался для реконструкции 3D модели поверхности (стенок) трещины гидроразрыва, полученных в ходе лабораторных экспериментов (Рисунок 16). Для повышения эффективности и достоверности результатов в сканер были встроены гибридный синий лазер и светодиодный источник света. Высокое разрешение изображений обеспечивается минимальным расстоянием между точками 0,05 мм, а точность - до 0,04 мм [Kadir, 2022]. Анализ полученных изображений поверхностей (стенок) гидроразрыва позволяет оценить их шероховатость и извилистость.



(a) **(b)**

Рисунок 16. (a) Ручной лазерный 3D сканер EinScan HX (Shining 3D) [EinScan HX Hybrid Blue Laser & LED Light Source Handheld 3D Scanner,]; (b) Изображения поверхностей образцов после испытания [Shevtsova и др., 2023].

2.2.3 Методика подготовки кубических образцов к эксперименту

Кубические образцы размером 250 мм×250 мм ×250 мм изготавливаются на заказ из необходимой горной породы. Далее в ФабЛаб (Сколтех) в центре образца выбуривается отверстие длиной 140 мм. Верхняя часть отверстия имеет параметры: ∅25 мм × 120 мм, нижняя часть отверстия заужена и ей соответствуют следующие размеры: ∅15 мм × 20 мм. На глубине отверстия 130 мм на боковой поверхности отверстия вырезается радиальный надрез, заглубленный в горную породу на ~ 3 мм. На дно отверстия помещается 2-3 мл двухкомпонентного эластичного клея, чтобы, застыв, он нивелировал влияние концентратора, возникшего на дне отверстия из-за следов коронки при выбуривании отверстия. После застывания двухкомпонентного эластичного клея в образец вклеивается металлическая трубка с помощью двухкомпонентного эластичного клея, имитирующая скважину с обсадкой, таким образом, чтобы зауженная часть отверстия (∅15 мм × 20 мм), оставалась открытой (необсаженной). В данной истинно трехосной системе акустические датчики вмонтированы в плиты, через которые задается нагрузка на кубический образец.

Давление закачиваемой жидкости измеряется датчиком давления, установленным вблизи нагнетательной скважины, и регистрируется одним из каналов системы регистрации сигналов акустической эмиссии для обеспечения точной синхронизации давления с записанными акустическими сигналами.

2.2.4 Экспериментальная методика (истинно трехосные условия нагружения)

После полного застывания двухкомпонентного клея, образец помещается в трехосную установку. Поскольку максимально допустимое давление для плоских домкратов ограничено 25 МПа, к кубическому образцу прикладываются значительно меньшие давления: σ_1=12 МПа, σ_2=8 МПа и σ_3=4 МПа. Минимальная нагрузка σ_3 = 4 МПа была приложена к гранитному блоку в вертикальном (осевом) направлении, перпендикулярном последующему раскрытию инициированной трещины гидроразрыва. Таким образом, схема приложенных к образцу нагрузок позволила смоделировать горизонтальные скважины на месторождении с попарной разницей между σ_1 и σ_2 и σ_2 и σ_3, равной минимальному главному напряжению в 4 МПа. После трехосного нагружения образец выдерживается 90 минут в созданных условиях. Перед закачкой жидкости выполняется прозвучивание. Далее запускается система акустического мониторинга и выполняется закачка жидкости гидроразрыва со скоростью 5 мл/мин.

2.2.5 Методика расчетов статистических параметров стенок (поверхности) трещины гидроразрыва

Цилиндрические образцы с созданными трещинами гидроразрыва были просканированы в универсальном компьютерном томографе phoenix v|tome|x L240, позволяющем воссоздать трехмерную модель поверхности трещины с точностью до 60 микрон. Для дальнейших этапов анализа координатный файл (xyz) воссозданной трещины (Рисунок 17, цветная поверхность) был аппроксимирован плоскостью наилучшего соответствия (best-fit) (x′y′z′) (Рисунок 17, черная плоскость). Местоположение такой плоскости определяется путем вычисления барицентра $b = x_0, y_0, z_0$ координат воссозданной трещины: $x_0, y_0, z_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} x_i, y_i, z_i$. Подробная методика получения плоскости наилучшего соответствия для трехмерной поверхности трещины изложена в [Abe, Deckert, 2021]. Таким образом, шероховатая поверхность трещины гидроразрыва была определена как совокупность элементов с различными высотами неровностей, углами наклона и статистическими значениями [Yin и др., 2019].

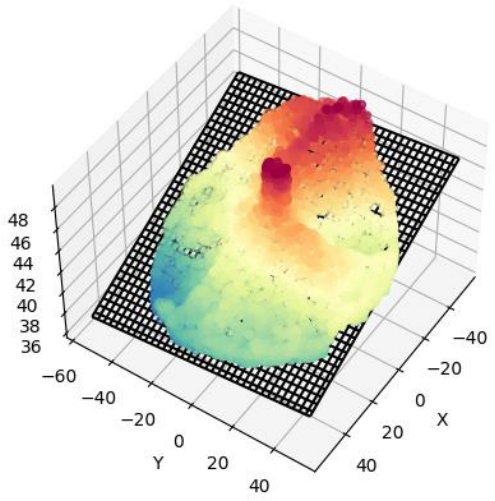


Рисунок 17. Иллюстрация воссозданной геометрии трещины гидроразрыва (цветная) и плоскостью наилучшего соответствия (черная) [Shevtsova и др., 2022].

Далее были рассчитаны статистические параметры воссозданной трещины гидроразрыва (3D-поверхности) с помощью уравнений 7-9: максимальная высота неровности $\boldsymbol{R_p}$, средняя шероховатость $\boldsymbol{R_m}$ и среднеквадратичная шероховатость $\boldsymbol{R_{rms}}$, где z_i - высота i-й точки, а z_a – средняя высота плоскости наилучшего соответствия. Статистические параметры обеспечивают прямое сравнение между образцами, помогая количественно оценивать различные топографии поверхности [Cheng, Milsch, 2021].

$$R_p = max|z_i - z_a|, \quad (7)$$

$$R_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|z_i - z_a|, \quad (8)$$

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(z_i - z_a)^2}. \quad (9)$$

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. Чтобы измерить общую длину трещины, было выделено подмножество точек, лежащих вдоль самой крутой линии, а затем была получена сумма трехмерных расстояний между соседними точками. Чтобы получить значение извилистости, эта сумма была разделена на сумму двумерных расстояний между соседними точками.

2.2.6 Методика расчетов параметров трещины гидроразрыва

Эффективное давление гидроразрыва P_{net} определяется по формуле (5) как разница максимального давления жидкости в трещине P_b и минимального главного напряжения σ_3 при котором трещина открывается [Mack, Warpinski, 2000]: $P_{net} = P_b - \sigma_3$.

Согласно описанным методикам расчета [Bobrova и др., 2021; Stanchits и др., 2014], весь закачанный в образец объем жидкости можно разделить на две составляющие: 1) линейно возрастающий объем жидкости (можно аппроксимировать прямой линией), связанный со сжимаемостью породы и жидкости, упругим расширением нагнетательной системы вследствие повышения давления, и 2) нелинейно возрастающий объем жидкости, связанный с процессами заполнения трещин и пор при распространении гидроразрыва. Таким образом, объем жидкости, вошедшей в трещину; был рассчитан как разность всего объема жидкости, закачанной в ствол скважины, и линейно возрастающей составляющей объема жидкости. Как правило, резкое увеличение объема жидкости точно соответствует независимо измеренному началу удлинения образца, связанному с раскрытием трещины гидроразрыва, и увеличению акустической активности.

2.3 Описание магматических и осадочных горных пород

2.3.1 Покостовский гранит

Значительная часть данного исследования была посвящена изучению влияния реологических свойств различных жидкостей гидроразрыва на параметры инициируемых ими трещин. Поэтому, чтобы удовлетворить цели экспериментального моделирования, выбранная горная порода должна соответствовать некоторым требованиям: (1) горная порода должна быть однородной, чтобы исключить влияние природных включений, трещин, слоистости на инициируемую трещину гидроразрыва; (2) горная порода должна быть низкопроницаемой, чтобы исключить возможную утечку жидкости гидроразрыва; (3)

кроме того, значения физических характеристик выбранного Покостовского гранита (газопроницаемость, модуль Юнга, предел прочности породы при многостадийном трехосном сжатии, предел прочности при одноосном растяжении) оказались близкими по значениям к аналогичным физическим характеристикам ранее исследованных в лаборатории центра добычи углеводородов Сколтеха сланцев, отобранных из нетрадиционных коллекторов (Таблица 2). Таким образом, Покостовский гранит может быть модельным материалом, имитирующим низкопроницаемую породу нетрадиционных коллекторов. В то же время, для оптимизации технологий гидроразрыва, применяемых к разработке геотермальных источников энергии, гранит является целевой горной породой. Следовательно, Покостовский гранит полностью соответствует намеченной цели исследования.

Более того, перед целевыми лабораторными экспериментами гидроразрыва были определены фильтрационно-емкостные, деформационно-прочностные свойства и паспорт прочности на стандартных образцах (30 мм×60 мм) Покостовского гранита (Таблица 2). Детальное описание образцов Покостовского гранита было опубликовано в статье [Shevtsova и др., 2022].

Таблица 2. Физические свойства Покостовского гранита в сравнении с аналогичными свойствами нетрадиционных сланцев Доманиковской и Баженовской свит.

Параметр	Покостовский гранит	Доманиковская свита	Баженовская свита
Средняя эффективная проницаемость по азоту (N_2), нД	656.40	0.42 – 4.85	–
Средняя пористость, %	1.22	1.95 – 3.45	0.50 – 9.50
Предел прочности при одноосном растяжении (Бразильский тест), МПа	7.20	7.65 – 10.40	2.00 – 19.00
Предел прочности породы при многостадийном трехосном сжатии, МПа	364.20	–	–
Модуль Юнга E, ГПа	68.79	46.48 – 79.00	3.60 - 19.00
Коэффициент Пуассона ν	0.22	0.10 – 0.25	0.09 – 0.34
Сцепление, МПа	28.00	–	–
Угол внутреннего трения, °	44.20	–	–

Блоки гранита были отобраны в Покостовском карьере (Житомирская область, Украина) (Рисунок 18), и затем из них были изготовлены цилиндрические образцы, подходящих для лабораторных экспериментов размеров (Таблица 3).

Рисунок 18. Схематическое расположение Покостовского карьера (Украина).

Таблица 3. Геометрические размеры цилиндрических образцов Покостовского гранита.

№ п.п.	№ образца	Диаметр, мм	Длина, мм	Масса, г	Плотность, г/см^3
1	WG-705	100.69	99.55	2158.81	2.72
2	WG-706	100.70	98.75	2143.33	2.73
3	WG-707	99.34	94.58	1985.61	2.71
4	WG-708	99.24	99.10	2076.56	2.71
5	WG-709	99.34	110.89	2353.84	2.74
6	WG-711	99.54	110.63	2344.69	2.72
7	WG-713	99.54	106.66	2260.14	2.72
8	WG-714	99.58	107.84	2284.34	2.72
9	WG-715	99.57	108.27	2301.12	2.73
10	WG-716	99.31	108.24	2288.44	2.73
11	WG-717	99.26	108.88	2299.70	2.73
12	WG-719	99.46	110.95	2344.18	2.72
13	WG-721	99.43	109.10	2304.35	2.72
14	WG-722	99.61	110.84	2355.62	2.73
15	WG-723	99.55	111.61	2370.56	2.73

Покостовский гранит представляет собой однородную светло-серую магматическую горную породу, обладающую среднезернистой структурой (Рисунок 19). Данный гранит также содержит шлиры, размеры которых достигают до 5-6 мм.

Рисунок 19. Внешний вид поперечного среза Покостовского гранита.

Минералогический состав гранита был предварительно определен с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) и представляет собой: кварц (42,9%), олигоклаз (31,8%), микроклин (20%), биотит (5,3%). Рисунок 20 демонстрирует снимки шлифа Покостовского гранита.

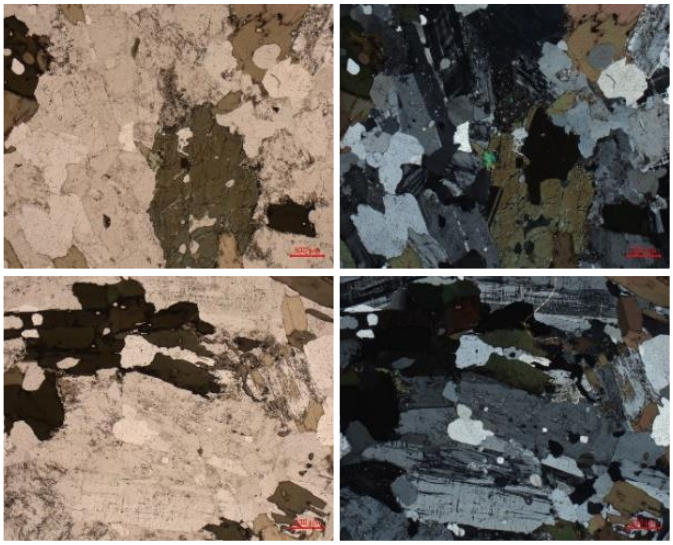
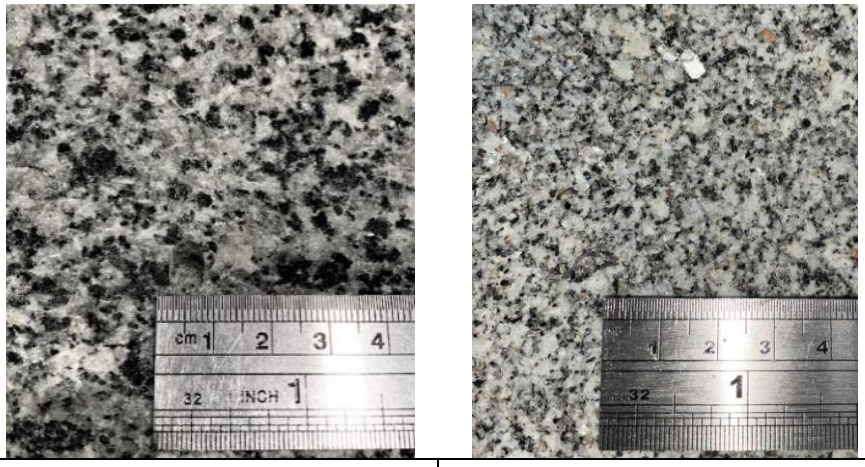


Рисунок 20. Снимок шлифа Покостовского гранита под микроскопом (слева – параллельные николи), (справа – скрещенные николи).

2.3.2 Ташмурунский гранит

Так как через некоторое время от начала проведения лабораторных экспериментов возникла потребность «импортозаместить» Покостовский гранит, наиболее подходящим по физическим свойствам и минеральному составу из имеющих отечественных аналогов оказался Ташмурунский гранит. Ташмурунское месторождение гранита расположено в Республике Башкортостан, Россия. Стоит отметить, что применяемая при добыче данного гранита технология исключает взрывные методы, которые могут вызвать дефекты горной породы и повлиять на результаты лабораторных экспериментов, и представляет собой сочетание технологий буроклинового метода (метод тихого взрыва) и разрезания горной породы (метод камнереза) [Tashmurunsky quarry, 2020].

Ташмурунский гранит, аналогично Покостовскому, представляет собой однородную светло-серую магматическую горную породу, обладающую мелко-среднезернистой структурой. Рисунок 21 демонстрирует сравнение внешнего вида поперечных срезов Покостовского и Ташмурунского гранитов.



Покостовский гранит (WG)	**Ташмурунский гранит(TG)**

Рисунок 21. Поперечный срез Покостовского гранита (слева) и Ташмурунского гранита (справа).

Таблица 4 описывает сравнение минералогических составов Ташмурунского гранита [Tashmurunsky quarry, 2020] и Покостовского гранита (РСА).

Таблица 4. Минералогический состав Покостовского и Ташмурунского гранитов.

	Покостовский гранит	Ташмурунский гранит
Кварц, %	42.9	29.0
Микроклин, %	20.0	40.0
Олигоклаз, %	31.8	–
Плагиоклаз, %	–	25.0
Биотит, %	5.3	5.0
Другие минералы, %	–	1.0

Аналогично проведенным исследованиям Покостовского гранита (Таблица 2), для Ташмурунского гранита также были также определены фильтрационно-емкостные параметры, деформационно-прочностные свойства и паспорт прочности на стандартных образцах (30 мм×60 мм) (Таблица 5). Стоит обратить внимание, что значения фильтрационных свойств Покостовского и Ташмурунского гранитов практически равны. Сопоставление значений деформационно-прочностных свойств данных гранитов демонстрирует незначительные отличия, которые можно объяснить несколько различающимися структурой и минералогическим составом.

Таблица 5. Основные фильтрационно-емкостные и деформационно-прочностные характеристики Ташмурунского гранита.

Параметр	**Значение**
Средняя эффективная проницаемость по гелию (He), мД	0.005
Средняя пористость, %	1.10
Предел прочности при одноосном растяжении (Бразильский тест), МПа	5.50
Предел прочности породы при многостадийном трехосном сжатии, МПа	447.62
Модуль Юнга E, ГПа	62.55
Коэффициент Пуассона ν	0.18
Сцепление, МПа	24.40
Угол внутреннего трения, °	57.00

Таблица 6 отображает геометрические размеры испытанных цилиндрических образцов, изготовленных из Ташмурунского гранита.

Таблица 6. Геометрические размеры цилиндрических образцов Ташмурунского гранита.

№ п.п.	**№ образца**	**Диаметр, мм**	**Длина, мм**	**Масса, г**	**Плотность, г/см^3**
1	TG-701	98.87	112.41	2323.07	2.69
2	TG-703	98.84	115.36	2382.59	2.69
3	TG-704	98.90	114.60	2369.77	2.69
4	TG-717	99.08	116.67	2427.14	2.70

Таблица 7 отображает геометрические размеры испытанных кубических образцов, также изготовленных из Ташмурунского гранита.

Таблица 7. Геометрические размеры кубических образцов Ташмурунского гранита.

№ п.п.	**№ образца**	**Длина грани 1**	**Длина грани 2**	**Длина грани 3**	**Длина грани 4**
		мм	мм	мм	мм
1	TG-3D-01	250.62	251.67	250.62	251.38
2	TG-3D-03	250.46	251.89	250.46	251.71
3	TG-3D-04	251.39	252.84	251.54	252.92
4	TG-3D-05	251.74	252.62	251.69	252.41

2.3.3 Трещиноватый Ташмурунский гранит (нагретый до 800°C)

С целью изучения особенностей распространения трещины гидроразрыва в трещиноватых горных породах часть лабораторных экспериментов проводилась на образцах трещиноватого Ташмурунского гранита. Некоторые исследователи [Kolawole, Ispas, 2020; Llanos и др., 2017] обращают значительное внимание на изучение процессов гидроразрыва в трещиноватых горных породах, так как наличие природных трещин в сланцах достаточно распространено (Рисунок 22).

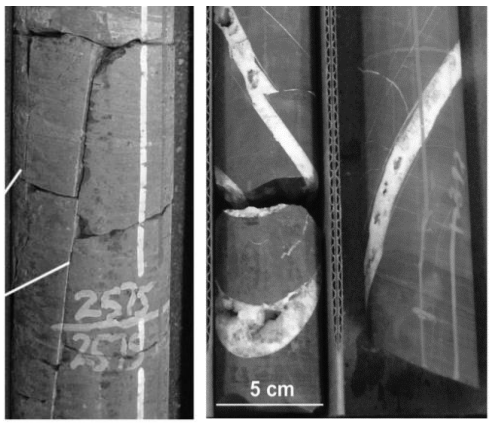


Рисунок 22. Фотография керна трещиноватой горной породы (слева – незаполненные трещины, справа – залеченные кальцитом трещины) [Gale, Reed, Holder, 2014].

Так как подготовка образцов для экспериментов гидроразрыва из трещиноватого керна не столько затруднительна, а скорее невозможна, было принято решение выполнять эксперименты гидроразрыва в образцах трещиноватого гранита. Из статьи [Yang и др., 2020] было получено, что переход кварца из α-формы в β-форму при температуре превышающей 573°C приводит к увеличению объема на 5% и сопутствующему появлению микротрещин между кристаллическими зернами (Рисунок 23). Во избежание теплового шока постоянная скорость нагрева образца не должна превышать 5°C/мин [Fan и др., 2018]. Предварительно подготовленные к эксперименту гидроразрыва цилиндрические образцы Ташмурунского гранита были подвергнутому высокотемпературному (800 °C) нагреву со скоростью 2,77 °C/мин (Рисунок 13). Подробнее процедура высокотемпературного нагрева изложена в разделе 2.2.1.

25°C **800°C**

Рисунок 23. Поперечный срез ненагретого (слева) и нагретого до 800°C (справа) образцов Ташмурунского гранита.

Таблица 8 демонстрирует сравнение фильтрационно-емкостных и деформационно-прочностных свойств ненагретого (25°C) и нагретого до 800°C Ташмурунских гранитов.

Таблица 8. Сравнение свойств ненагретого и нагретого до 800°C Ташмурунского гранита.

Параметр	Размерность	25°C	800°C
Средняя эффективная проницаемость по гелию (He)	мД	0.005	0.90
Средняя пористость	%	1.10	3.10
Предел прочности при одноосном растяжении (Бразильский тест)	МПа	5.50	2.54
Предел прочности при одноосном сжатии	МПа	165.69	115.87
Предел прочности породы при многостадийном трехосном сжатии	МПа		
Модуль Юнга E	ГПа	62.55	36.65
Коэффициент Пуассона ν	–	0.18	0.11
P_V	м/с	4200.00	1200.00

Таблица 9 отображает геометрические размеры испытанных цилиндрических образцов трещиноватого Ташмурунского гранита.

Таблица 9. Геометрические размеры цилиндрических образцов трещиноватого Ташмурунского гранита.

№ п.п.	**№ образца**	**Диаметр, мм**	**Длина, мм**	**Масса, г**	**Плотность, г/см^3**
1	TG-714h	101.81	115.65	2318.64	2.46
2	TG-715h	101.71	115.80	2323.41	2.47

2.3.4 Сланец

Чтобы изучить влияние природных особенностей горной породы таких как слоистость, неоднородность, трещиноватость на параметры и динамику трещины гидроразрыва, эксперименты проводились на образцах сланцев. Исчерпывающее описание данной сланцевой породы было опубликовано в статье [Bobrova и др., 2021]. Шесть образцов кремнисто-битуминозно-карбонатных пород (Рисунок 24) были предоставлены для исследований ООО "РИТЭК". Компания работает в 10 субъектах Российской Федерации, специализируется на производстве, испытаниях и внедрении новых технологий добычи нетрадиционных углеводородов и повышения нефтеотдачи пластов.

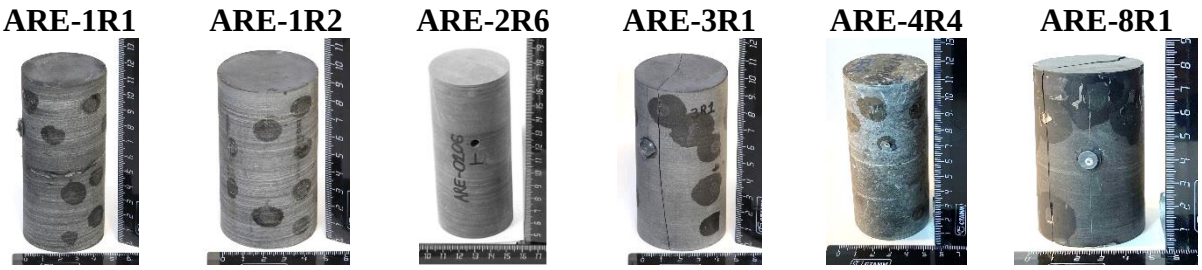


Рисунок 24. Фотографии образцов сланцев.

Скважина глубиной 6300 метров, из которой были отобраны данные образцы сланцев, располагается в Волгоградской области (Рисунок 25) и вскрывает отложения артинского яруса подсолевого комплекса. Скважина расположена на левом берегу Волги на Ерусланской газоконденсатной структуре, которая соответствует северной части Ахтубинско-Ерусланского мегавала. Нижнепермские терригенно-карбонатные отложения ранее были признаны продуктивными в районе Прикаспийской впадины (газоконденсатные и нефтяные месторождения) [Пунанова и др., 1996].

Рисунок 25. Схематическая карта расположения скважины, из которой были отобраны образцы сланцев артинского яруса [Bobrova и др., 2021].

При исследовании керна нижнеартинских отложений, отобранных из ранее упомянутой скважины, были зафиксированы прямые признаки нефтегазоносности, выраженные в аномальных концентрациях свободных углеводородов (УВ), которые находились на уровне $n\times10^{-1}$ – 10^{-2} %, что на порядок выше фона ($n\times10^{-3}$ %) [Остроухов и др., 2019].

Важно отметить, что данные образцы были отобраны из одной скважины, но с разных интервалов глубины, поэтому имеют разное литологическое описание, разную структуру, отличающиеся значения прочностных характеристик. Предоставленные

образцы соответствуют пяти различным пачкам с похожей слоистой структурой и составом. Нижнепермские отложения представлены карбонатными циклическими формациями ассельской, сакмарской, артинской и ангидрито-доломитовой артинской толщей [Михалькова, Бражников, Берестецкая, 1990].

Литологическое описание данных сланцев (Рисунок 26) сопоставимо с литологическим описанием сланцевых пород Доманика, имеющих аналогичный состав. В свою очередь, минералогический состав Домаников формации близок к одному из крупнейших сланцевых месторождений США – Eagle Ford [Gabnasyrov и др., 2016].

Рисунок 26 демонстрирует краткое литолого-стратиграфическое описание пород, концентрация общего органического углерода (Total organic carbon) и геомеханические характеристики пачек отложений артинского яруса.

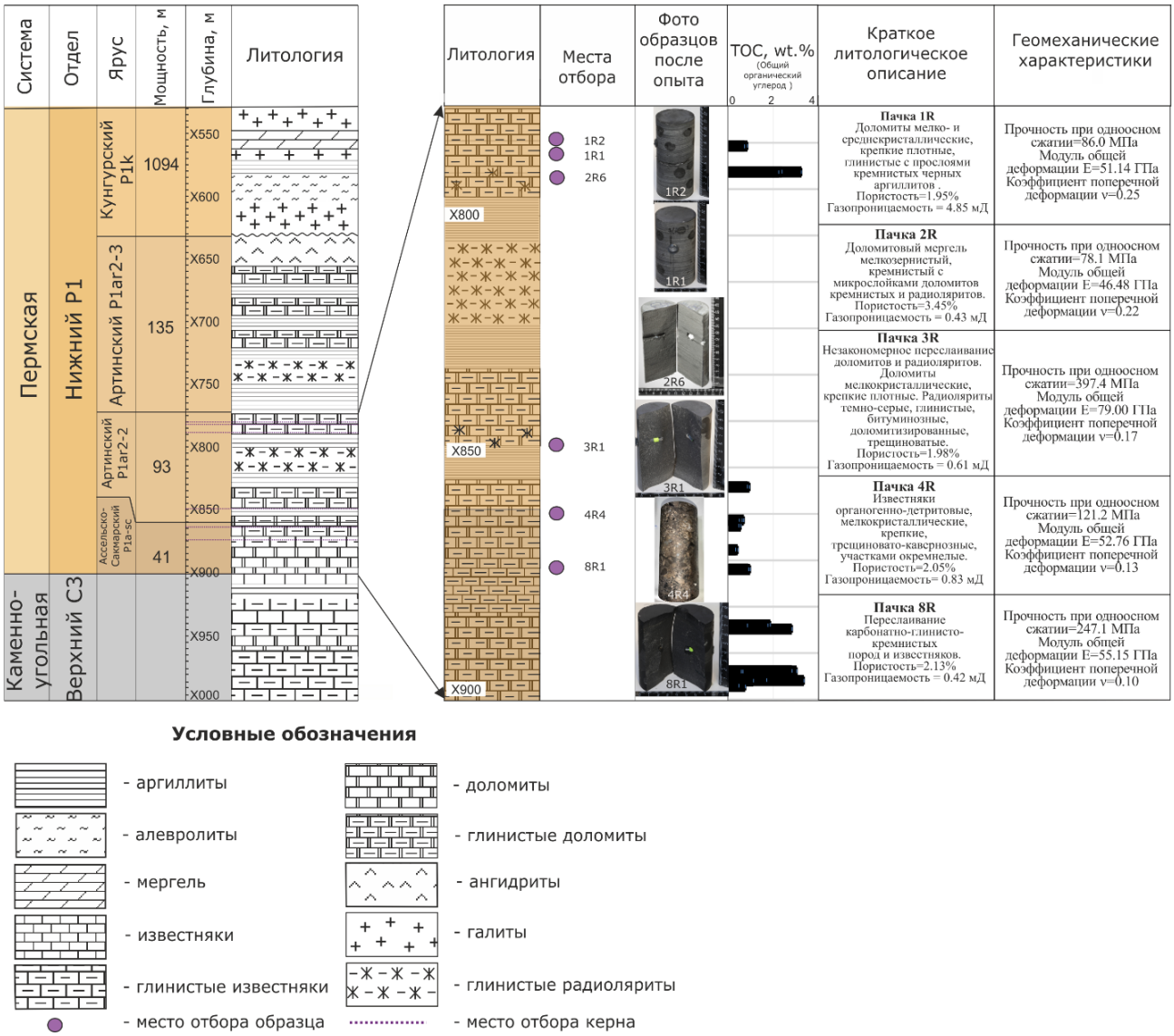


Рисунок 26. Обобщенная литолого-стратиграфическая колонка (см. легенду), концентрация общего органического углерода (TOC), литологическое описание и геомеханические характеристики пачек.

По классификации коллекторов по величине коэффициента проницаемости (по Г.И. Теодоровичу) пачки 2, 3, 4 и 8 можно отнести к классу плохопроницаемых коллекторов (0,42 мД – 0,83 мД). Проницаемость отложений пачки 1, составляющая 4,85 мД, значительно выше и соответствует слабопроницаемому классу коллекторов.

Данные отложения состоят преимущественно из карбонатных и глинистых пород с примесью кремнистых радиолярий. В то время как карбонатный компонент присутствует во всех пачках, кремнистые породы содержатся в пачках 2, 3 и 8. Более того, пачка 8 соответствует равномерному переслаиванию карбонатных, глинистых и кремнистых пород. Концентрация TOC варьирует до 3 мас.% для литологических единиц в пределах разреза.

Кроме того, каждый образец подвергался ультразвуковому прозвучиванию по различно ориентированным трассам. Анизотропные значения скоростей P-волн приведены в Таблице 10, эти значения были использованы для локализации источников сигналов АЭ. Образцы ARE-1R1 и ARE-2R6 имеют самые высокие значения абсолютной анизотропии (-9,5% и -12,5% соответственно) среди всех сланцевых образцов. Для этих образцов скорость P-волны в вертикальном направлении меньше, чем в горизонтальном направлении. Анизотропия может быть объяснено существованием в сланцевых образцах слоистости, которая перпендикулярна вертикальной оси.

Таблица 10. Скорости распространения продольных волн в вертикальном P_V и горизонтальном P_H направлениях. A_P – анизотропия продольной волны, посчитанная как $A_P = \frac{P_V - P_H}{P_V}$.

№ образца	**ARE-1R1**	**ARE-1R2**	**ARE-2R6**	**ARE-3R1**	**ARE-4R4**	**ARE-8R1**
№ п.п.	1	2	3	4	5	6
P_V, м/с	4574	5227	4374	5922	5928	5167
P_H, м/с	5008	5241	4920	5572	5630	4973
A_P, %	-9.4	-0.27	-12.5	5.9	5.0	3.7

Образцы, отобранные из вышеупомянутых литотипов, были всесторонне охарактеризованы с помощью следующих геомеханических исследований: Бразильский тест (для определения предела прочности при одноосном растяжении), одноосное сжатие (для определения предела прочности при одноосном сжатии) и многостадийное трехосное сжатие (для определения деформационно-прочностных характеристик, угла внутреннего трения и сцепления). Таблица 11 демонстрирует основные фильтрационно-емкостные и деформационно-прочностные характеристики исследованных сланцев. Самые высокие показатели пределов прочности на растяжение и одноосное сжатие наблюдаются у образцов из пачек 8 и 3. Следует отметить, что образцы из пачки 3 имеют самое высокое

значение предела прочности. Самые высокие значения модуля Юнга были продемонстрированы в образцах 3, 8 и 4 пачек. Взаимосвязи деформационно-прочностных характеристик с глубиной не наблюдается.

Таблица 11. Основные фильтрационно-емкостные и деформационно-прочностные характеристики сланцев.

Параметры	Размерность	**ARE-1R1**	**ARE-1R2**	**ARE-2R6**	**ARE-3R1**	**ARE-4R4**	**ARE-8R1**
Средняя эффективная проницаемость по гелию (He)	мД	4.85	4.85	0.43	0.61	0.83	0.42
Средняя пористость	%	1.95	1.95	3.45	1.98	2.05	2.13
Предел прочности при одноосном растяжении (Бразильский тест)	МПа	7.65	7.65	10.20	18.55	8.60	10.40
Предел прочности при одноосном сжатии	МПа	86.8	86.8	78.1	397.4	121.2	247.1
Модуль Юнга E	ГПа	51.14	51.14	46.48	79.00	52.76	55.15
Коэффициент Пуассона ν	–	0.25	0.25	0.22	0.17	0.13	0.10

Таблица 12 отображает геометрические размеры испытанных цилиндрических образцов сланцев.

Таблица 12. Геометрические размеры цилиндрических образцов сланцев.

Параметры	**ARE-1R1**	**ARE-1R2**	**ARE-2R6**	**ARE-3R1**	**ARE-4R4**	**ARE-8R1**
Глубина отбора, м	5781.28	5780.18	5787.06	5847.87	5861.1	5873.64
Длина, мм	108.78	87.35	110.10	96.51	104.02	75.76
Диаметр, мм	49.08	49.22	48.98	49.30	49.11	49.20
Длина/Диаметр	2.22	1.77	2.25	1.96	2.12	1.54
Масса, г	560.23	447.60	538.60	508.10	532.70	387.24
Объем, $см^3$	205.80	166.20	207.45	184.23	197.04	144.03
Плотность, $г/см^3$	2.72	2.69	2.60	2.76	2.70	2.69

2.3.5 Песчаник

Образцы песчаника были получены из скважины Прирахтовского месторождения (Омская область, Россия) (Рисунок 27). Керн был отобран в интервале глубин 2426,35–2428,75 метров. Подробное описание свойств песчаников опубликовано в [Shevtsova и др., 2023].

Рисунок 27. Схематическая карта расположения Прирахтовского месторождения (Омская область, Россия).

Исследуемый песчаник представляет собой светло-серую мелкозернистую осадочную породу (Рисунок 28). Песчаник состоит из округлых мелких зерен кремнезема (кварца) одинакового размера, которые сцементированы глинистым цементом. Размер зерен песчаника не превышает 0,5 мм.

Рисунок 28. Внешний вид поперечного среза песчаника.

Минералогический состав песчаника был определен с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) в рентгеновском дифрактометре Huber G670. Рисунок 29. Минералогический состав песчаника. Рисунок 29 демонстрирует минералогический состав песчаника в зависимости от глубины отбора. Песчаник состоит из кварца, альбита, каолинита, иллита и группы хлорита.

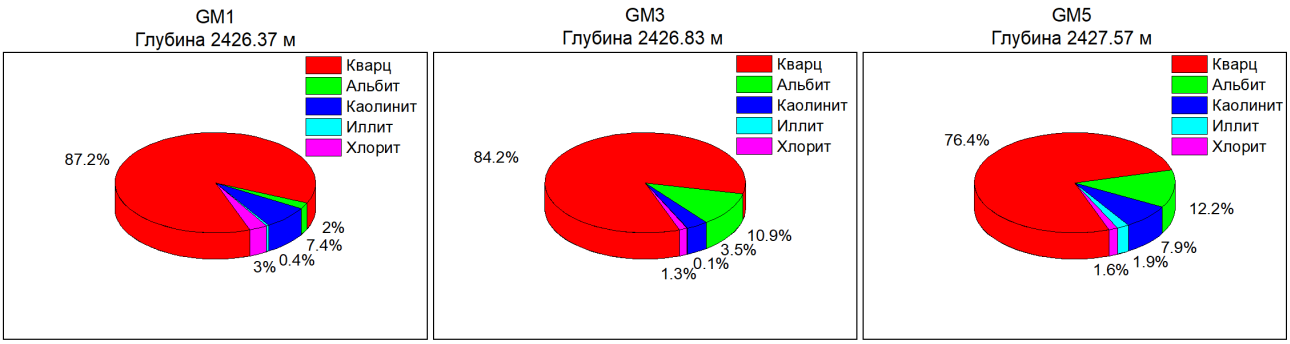


Рисунок 29. Минералогический состав песчаника.

Таблица 13 отображает фильтрационно-емкостные и деформационно-прочностные характеристики испытанного песчаника.

Таблица 13. Основные фильтрационно-емкостные и деформационно-прочностные характеристики песчаника.

Параметр	**Диапазон значений**
Средняя эффективная проницаемость по гелию (He), мД	1.05 – 3.32
Средняя пористость, %	13.12-14.99
Предел прочности породы при многостадийном трехосном сжатии, МПа	157.94 – 162.38
Модуль Юнга E, ГПа	12.94 – 14.80
Коэффициент Пуассона ν	0.09 – 0.12
Сцепление, МПа	16.10 – 16.50
Угол внутреннего трения, °	35.50 – 36.00

Таблица 14 отображает геометрические размеры испытанных цилиндрических образцов песчаника.

Таблица 14. Геометрические размеры цилиндрических образцов песчаника.

Параметры	**GM4-101**	**GM5-101**	**GM6-102**	**GM7-101**
	1	2	3	4
Глубина отбора, м	2427.30	2427.54	2428.00	2428.56
Длина, мм	104.98	99.33	104.85	97.39
Диаметр, мм	77.55	77.48	77.52	77.80
Масса, г	1111.19	1051.68	1149.72	1026.63
Объем, $см^3$	495.61	468.09	494.61	462.75
Плотность, $г/см^3$	2.24	2.26	2.32	2.20

2.4 Описание жидкостей гидроразрыва

В данных лабораторных экспериментах были использованы жидкости гидроразрыва на водной и безводной основах с широким диапазоном вязкостей (Таблица 15). В данной работе динамическая вязкость жидкостей представлена в сантипуазах (1 сП=1 мПа·с). Часть жидкостей для лабораторных экспериментов были предоставлены сотрудниками кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» в рамках сотрудничества отделений научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты». Скорость закачки жидкостей гидроразрыва в образцы была постоянной и составляла 5 мл/мин. Только для высоковязких жидкостей ПМС-10 000 и ПМС-100 000 скорость закачки составила 0.5 мл/мин. Исследования реологических свойств жидкостей гидроразрыва проводились на ротационном вискозиметре Grace M5600 с комбинацией ячейки/шариков R1/B5 и реометре Anton Paar Phisica MCR 302.

Таблица 15. Реологические свойства жидкостей гидроразрыва.

№ п.п.	Наименование жидкости	Основа жидкости	Вязкость жидкости при 100 $с^{-1}$ (t=25°C), сП	Вязкость жидкости при 300 $с^{-1}$ (t=25°C), сП
1	Жидкий CO_2	Безводная	~0.13	≪0.13
2	Дистиллированная вода	Водная	1	1
3	Линейный гель (ЛГ)	Водная	17	12
4	Минеральное масло Multitherm PG-1	Безводная	46	46
5	НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ	Водная	81	50
6	Полигель	Водная	95	55
7	Дизельная система 2 (ДС-2) (Химеко Н)	Безводная	102	36
8	Пенно-азотная система (ПАС)	Безводная	153	–
9	Дизельная система 1 (ДС-1) (Химеко Т)	Безводная	710	270
10	Силиконовое масло ПМС-1000	Безводная	1000	1000
11	Дизельная система 3 (ДС-3) (Химеко Н)	Безводная	1220	311
12	Силиконовое масло ПМС-10000	Безводная	10000	10000
13	Силиконовое масло ПМС-100000	Безводная	100000	100000

2.4.1 Жидкости гидроразрыва на водной основе

Ньютоновские жидкости гидроразрыва на водной основе

Дистиллированная вода

Дистиллированная вода является одой из самых дешевых, доступных и хорошо изученных жидкостей гидроразрыва. Кроме того, вода является самой распространенной основой для неньютоновских жидкостей гидроразрыва. Данные лабораторные эксперименты проводились в комнатных условиях $t = 25℃$, в которых вязкость дистиллированной воды постоянна и равна 1 сП. Чтобы сделать видимой область распространения закачиваемой жидкости, что в случае с маловязкой жидкостью может повторять форму трещины, к ней был добавлен синий краситель, не изменяющий ее реологические свойства.

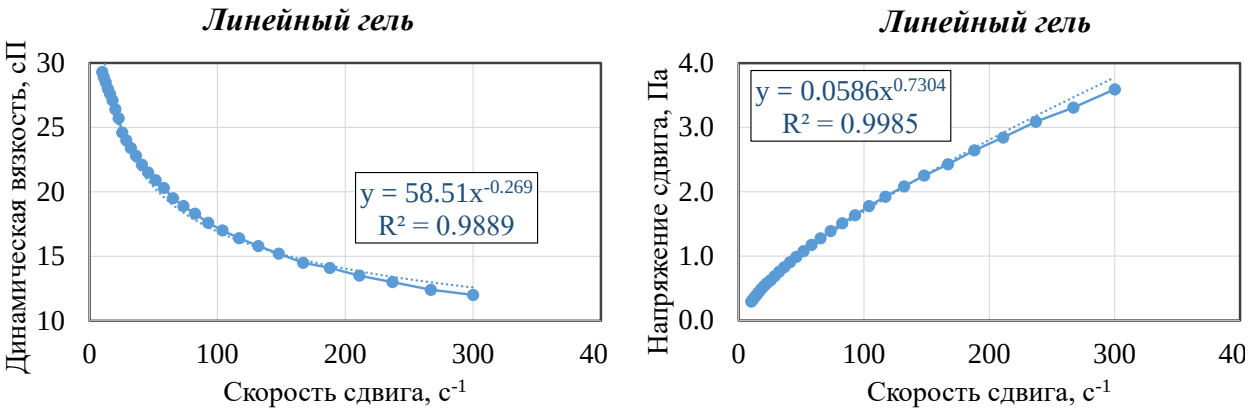
Неньютоновские жидкости гидроразрыва на водной основе

Для проведения эффективных операций гидроразрыва пласта (ГРП) необходимо использовать жидкости с вязкостью, достаточной для создания трещин и доставки проппанта, но в то же время доступной и дешевой. Так, например, широко распространенные и не требующие значительных денежных вложений водные растворы полимеров широко используются, но имеют ряд существенных недостатков, таких как набухание глинистой компоненты, ухудшение фильтрационных свойств призабойной зоны за счет кольматации, образования устойчивых эмульсий с пластовой жидкостью. Учеными разработан ряд эффективных добавок к уже существующим жидкостям и созданы модифицированные бесполимерные жидкости, снижающих некоторые негативные эффекты, что, однако, приводит к увеличению затрат. Состав и свойства модифицированной бесполимерной жидкости гидроразрыва на основе вязкоупругого поверхностно-активного вещества отечественного производства - НЕФТЕНОЛ ВУПАВ изложена в [Силин и др., 2020]. Таблица 16 демонстрирует составы использованных в данном исследовании жидкостей гидроразрыва на водной основе. Стоит отметить, что данные жидкости гидроразрыва широко применяются в полевых условиях.

Таблица 16. Состав жидкостей гидроразрыва на водной основе, применяемых в полевых операциях ГРП.

	Линейный гель (ЛГ)	Жидкость на основе синтетического полимера (Полигель)	Бесполимерная жидкость (НЕФТЕНОЛ ВУПАВ)
Фото			
Гуар, кг/м³	2.00	–	–
Гелеобразователь синтетический – полиакриламид (ПАА) Полигель, л/м³	–	8	–
Амфотерное поверхностно-активное вещество (НЕФТЕНОЛ ВУПАВ), л/м³	–	–	70
Структурирующий реагент (РС-1), л/м³	–	–	18
Стабилизатор глины, л/м³	1.20	2	–
Деэмульгатор, л/м³	1.00	2	–
Деструктор, кг/м³	–	0.5	–
Биоцид, кг/м³	0.50	–	–

Рисунок 30 демонстрирует реологические свойства линейного геля (ЛГ). Так как ЛГ является неньютоновской жидкостью, то графики иллюстрируют изменения реологических свойств в зависимости от скорости сдвига.



(a) **(b)**

Рисунок 30. (a) Динамическая вязкость линейного геля в зависимости от скорости сдвига; (b) Напряжение сдвига линейного геля в зависимости от скорости сдвига.

Рисунок 31 показывает изменение динамической вязкости в зависимости от скорости сдвига для бесполимерной жидкости (НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ) и Полигеля на основе синтетического полимера.

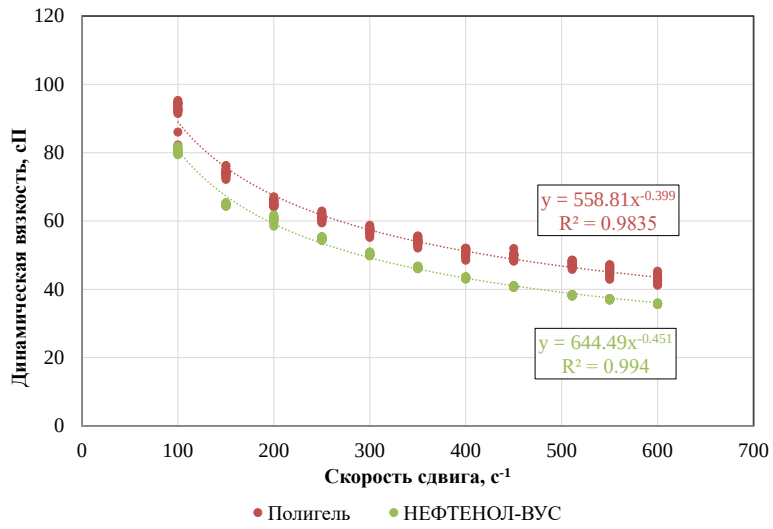


Рисунок 31. Вязкость в зависимости от скорости сдвига для бесполимерной (НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ) и полимерной (Полигель) жидкостей на водной основе.

Для полимерной жидкости гидроразрыва (Полигель) напряжение сдвига увеличивается с увеличением скорости сдвига значительнее, чем для бесполимерной жидкости (НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ) (Рисунок 32).

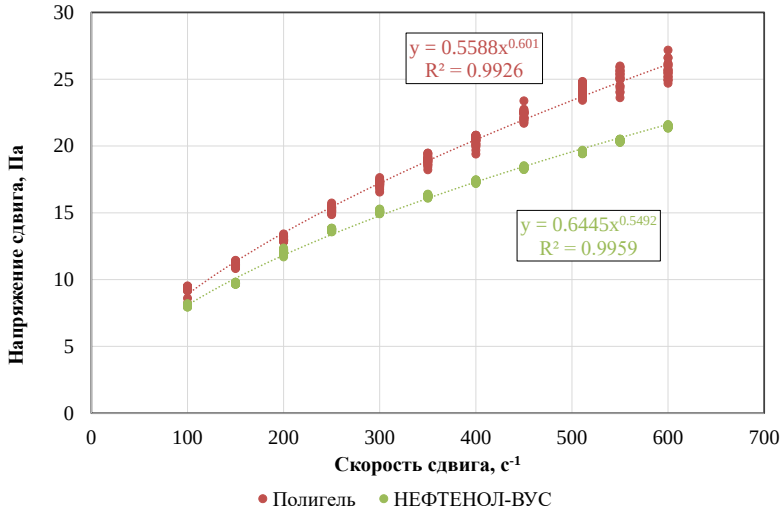


Рисунок 32. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для бесполимерной (НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ) и полимерной (Полигель) жидкостей на водной основе.

2.4.2 Безводные жидкости гидроразрыва пласта.

Ньютоновские безводные жидкости гидроразрыва

Минеральное масло Multitherm PG-1

Минеральное масло Multitherm PG-1 использовалось в качестве жидкости гидроразрыва в экспериментах со сланцевыми породами. Вязкость масла при комнатной

температуре 25°C составляет 46 сП. Кроме того, свойства минерального масла Multitherm PG-1 были изучены и подробно описаны [Non-Toxic Heat Transfer Fluid MultiTherm PG-1. Phisical properties, 2018].

Силиконовое масло (жидкость полиметилсилоксановая (ПМС))

Для лабораторных экспериментов в качестве жидкостей гидроразрыва также применялись силиконовые масла (полиметилсилоксановые жидкости), вязкость которых при комнатной температуре 25°C постоянна и равна 1000 сП, 10 000 сП и 100 000 сП. Предварительно в жидкости был добавлен синий краситель, не изменяющий реологические свойства, для отслеживания области их распространения в образцах.

Неньютоновские безводные жидкости гидроразрыва

Этот тип жидкостей для гидроразрыва пласта стал более популярным в последнее десятилетие. Одним из его основных преимуществ является отсутствие эффекта набухания глины. Кроме того, операции ГРП с закачкой жидкого или суперкритического CO_2 очень привлекательны для разработки месторождений, расположенных на аридных территориях, а источниками CO_2 могут быть атмосфера и попутные газы.

Жидкий диоксид углерода (L-CO_2)

Данный агент для гидроразрыва был приготовлен в лаборатории с созданием условий, соответствующих жидкому состоянию диоксида углерода, при давлении 7 МПа и при комнатной температуре 25°C. Рисунок 33 демонстрирует фазовую диаграмму состояния CO_2.

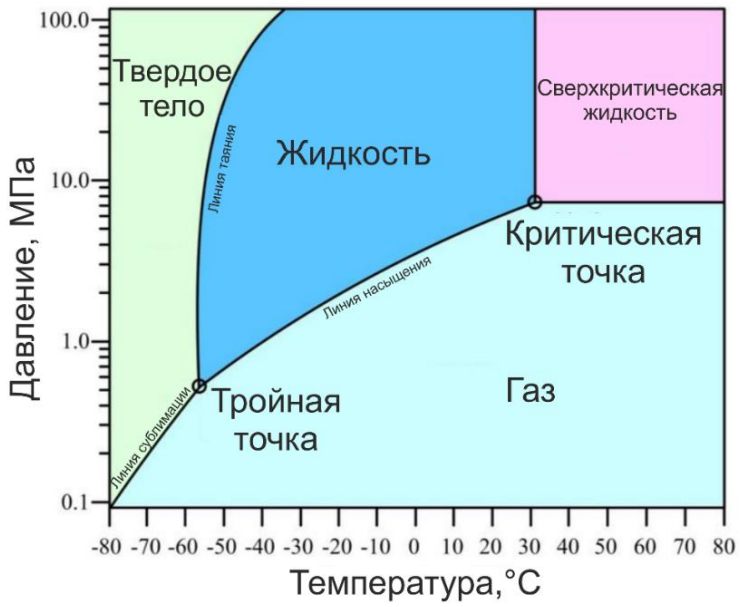


Рисунок 33. Фазовая диаграмма состояния диоксида углерода. Тройная точка (Triple point) возникает примерно при -56,6°C, 0,518 МПа, критическая точка возникает примерно при 31,1°C, 7,39 МПа [Gierzynski, 2016].

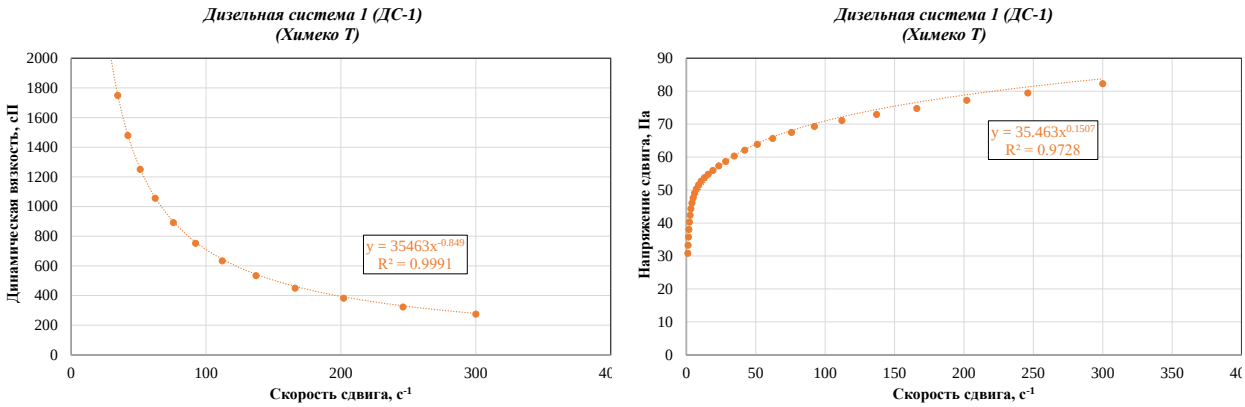
Жидкости гидроразрыва на основе дизельного топлива

Таблица 17 демонстрирует составы жидкостей гидроразрыва, для приготовления которых в качестве углеводородной основы было взято дизельное топливо. Для данных жидкостей гидроразрыва использовались два гелирующих комплекса – Химеко Т и Химеко Н. Гелеобразователь Химеко Н представляет собой смесь органических ортофосфорных эфиров. Активатор Химеко Н – мицеллярный раствор сульфата железа. Гелеобразователь Химеко Т – смесь органических ортофосфорных эфиров. Активатор Химеко Т – раствор органических соединений алюминия. Деструкторы в лабораторных экспериментах добавляются по необходимости.

Таблица 17. Общее описание состава жидкостей гидроразрыва на основе дизельного топлива.

	Дизельная система 1 (ДС-1) (Химеко Т)	Дизельная система 2 (ДС-2) (Химеко Н)	Дизельная система 3 (ДС-3) (Химеко Н)
Гелеобразователь Химеко Н, л/м³	–	7	40
Активатор Химеко Н, л/м³	–	7	40
Гелеобразователь Химеко Т, л/м³	20	–	–
Активатор Химеко Т, л/м³	8	–	–
Деструктор, кг/м³	10	–	–

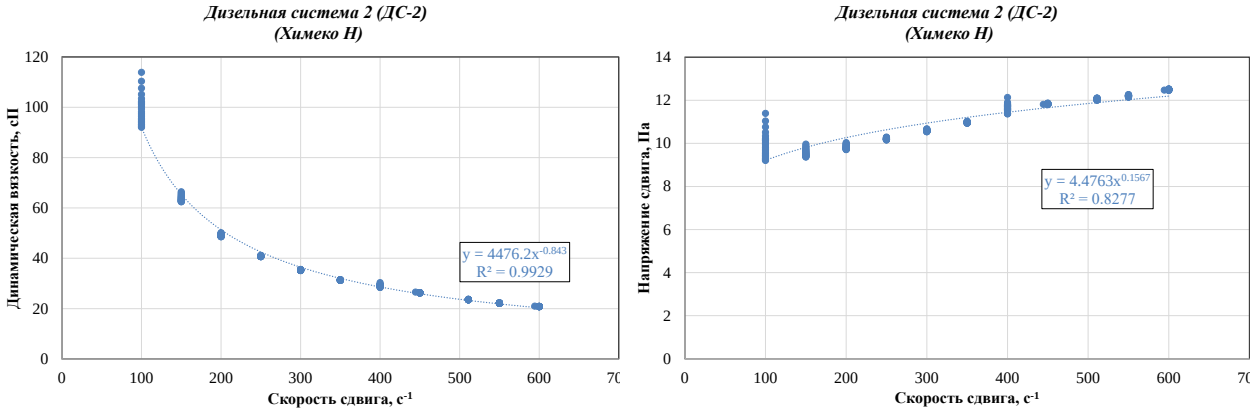
Рисунок 34 демонстрирует реологические свойства ДС-1. Так как данная жидкость является неньютоновской жидкостью, то графики иллюстрируют изменения реологических свойств в зависимости от скорости сдвига.



(a) **(b)**

Рисунок 34. (a) Динамическая вязкость ДС-1 в зависимости от скорости сдвига; (b) Напряжение сдвига ДС-1 в зависимости от скорости сдвига.

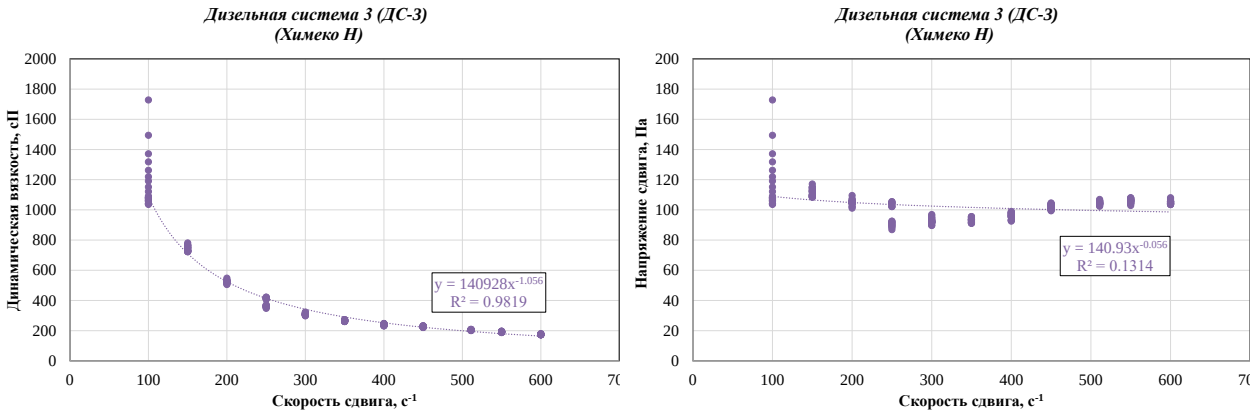
Рисунок 35 показывает изменение динамической вязкости в зависимости от скорости сдвига для ДС-2. Динамическая вязкость жидкости значительно уменьшается с увеличением скорости сдвига.



(a) **(b)**

Рисунок 35. (a) Динамическая вязкость ДС-2 в зависимости от скорости сдвига; (b) Напряжение сдвига ДС-2 в зависимости от скорости сдвига.

Самой вязкой из перечисленных жидкостей является ДС-3 (Рисунок 36) показывает снижение вязкости с увеличением скорости сдвига, который хорошо аппроксимируется, в то время как зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига плохо поддается аппроксимации из-за структурных особенностей жидкости.



(a) **(b)**

Рисунок 36. (a) Динамическая вязкость ДС-3 в зависимости от скорости сдвига; (b) Напряжение сдвига ДС-3 в зависимости от скорости сдвига.

Пенно-азотная система (ПАС)

Пенно-азотная система (ПАС) представляет собой вспененный в пеногенераторе гель на углеводородной основе (дизельное топливо) – дизельную систему 4 (ДС-4) (Химеко Т) (Таблица 18) и азота.

Таблица 18. Общее описание состава ДС-4, являющегося основой ПАС.

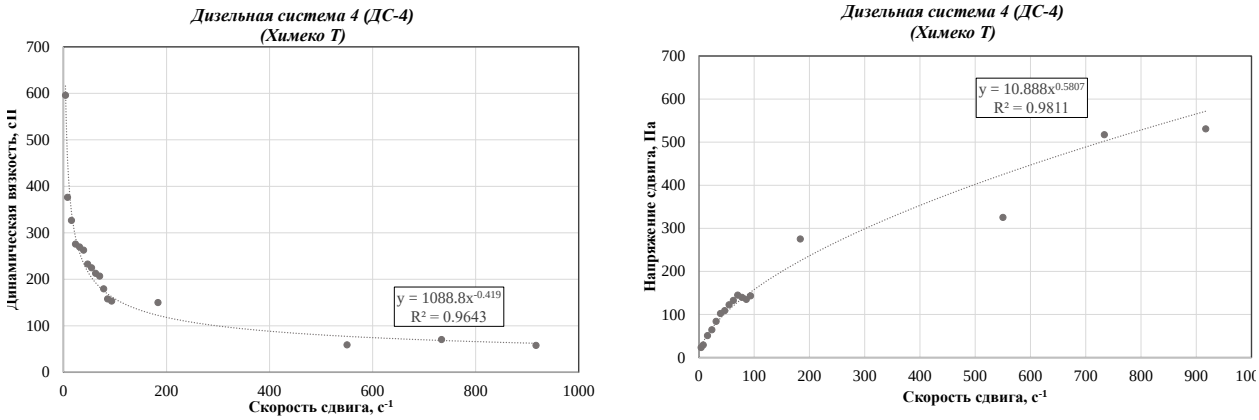
Дизельная система 4 (ДС-4) (Химеко Т)	
Гелеобразователь Химеко Т, л/м³	8
Активатор Химеко Т, л/м³	8
Вспенивающий агент, кг/м³	20

Таблица 19 демонстрирует сравнение динамической вязкости, измеренной по капилляру и стандартным реометром. Разница между значениями динамической вязкости, полученными с помощью двух измерительных методик, не превышает 15% для двух скоростей сдвига (45.86 $с^{-1}$ и 91.72 $с^{-1}$).

Таблица 19. Вязкость исходного геля ДС-4 и пены.

	Скорость фильтрации, мл/мин	Скорость сдвига, $с^{-1}$	Вязкость по капилляру, сП	Вязкость по реометру, сП
ДС-4	0.05	45.86	274.48	237.93
ДС-4	0.1	91.72	169.87	144.75
ПАС	0.05	45.86	233.05	–
ПАС	0.1	91.72	152.78	–

Рисунок 37 демонстрирует реологические свойства геля ДС-4, являющегося основой для ПАС.



(a) **(b)**

Рисунок 37. (a) Динамическая вязкость ДС-4 в зависимости от скорости сдвига; (b) Напряжение сдвига ДС-4 в зависимости от скорости сдвига.

Таблица 20 демонстрирует полный список жидкостей гидроразрыва, использованных в данном исследовании, и соответствующих образцов, в которые эти жидкости были закачаны.

Таблица 20. Полный список жидкостей гидроразрыва и образцов, в которые эти жидкости были закачаны.

№ п.п.	Жидкость гидроразрыва	№ образца
1	Дистиллированная вода	TG-704
2	Линейный гель (ЛГ)	WG-705, TG-703
3	НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ	WG-716
4	Полигель	WG-717
5	Минеральное масло Multitherm PG-1	ARE-1R1, ARE-1R2, ARE-2R6, ARE-3R1, ARE-4R4, ARE-8R1
6	ПМС-1000	WG-723, TG-701
7	ПМС-10 000	WG-719, GM5-101
8	ПМС-100 000	WG-713, GM7-101
9	ДС-1	WG-706, WG-708
10	ДС-2	WG-722
11	ДС-3	WG-721, TG-717, GM4-101, GM5-101, TG-714h, TG-715h
12	ПАС	WG-711, WG-714
13	Жидкий CO2	WG-707, WG-709, WG-715

3. Результаты экспериментов по инициации трещины гидроразрыва жидкостями различной вязкости, полученные на полноразмерных (10 см×10 см) цилиндрических образцах магматических горных пород

3.1 Результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва на образцах магматических горных пород (Покостовский гранит, Ташмурунский гранит)

3.1.1 Жидкости гидроразрыва на водной основе

3.1.1.1 Дистиллированная вода

Образец TG-704

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии. Стадия (a) описывает зарождение и распространение трещины до момента регистрации давления гидроразрыва – максимального значения кривой давления жидкости (голубая вертикальная пунктирная линия). Стадия (b) завершается в момент достижения трещиной боковой поверхности образца (красная вертикальная пунктирная линия). Этот момент был определен по данным АЭ. Стадия (c) демонстрирует процесс падения давления в скважине и последующее смыкание стенок трещины, который вызван увеличением значений σ_3 до значений σ_2. Рисунок 38 подробно описывает параметры, зарегистрированные во время распространения трещины гидроразрыва в образце TG-704.

В образце TG-704 на 266,30 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 38a, фиолетовая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло на 0,18 секунды раньше регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 43,2 МПа (Рисунок 38a, красная кривая). Падение давления в скважине наблюдается после достижения пикового значения.

Рисунок 38b демонстрирует положение поршня во время эксперимента (зеленая кривая). Анализ полученных результатов указывает на удлинение образца в вертикальном направлении, связанное с раскрытием трещины. В дополнение к датчику, фиксирующему положение поршня, на боковой поверхности образца были симметрично установлены экстензометры (датчики осевой деформации). В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано равным 4,3 микрона (Рисунок 38b, зеленый). В этот же момент времени, экстензометр Ext_A зарегистрировал удлинение образца приблизительно на 3,3 микрона (Рисунок 38b, синяя кривая), а экстензометр Ext_B – на 1,2 микрона (Рисунок 38b, красная кривая). Основываясь на измерениях деформации, можно предположить, что трещина распространялась асимметрично, главным образом в направлении датчика деформации Ext_A.

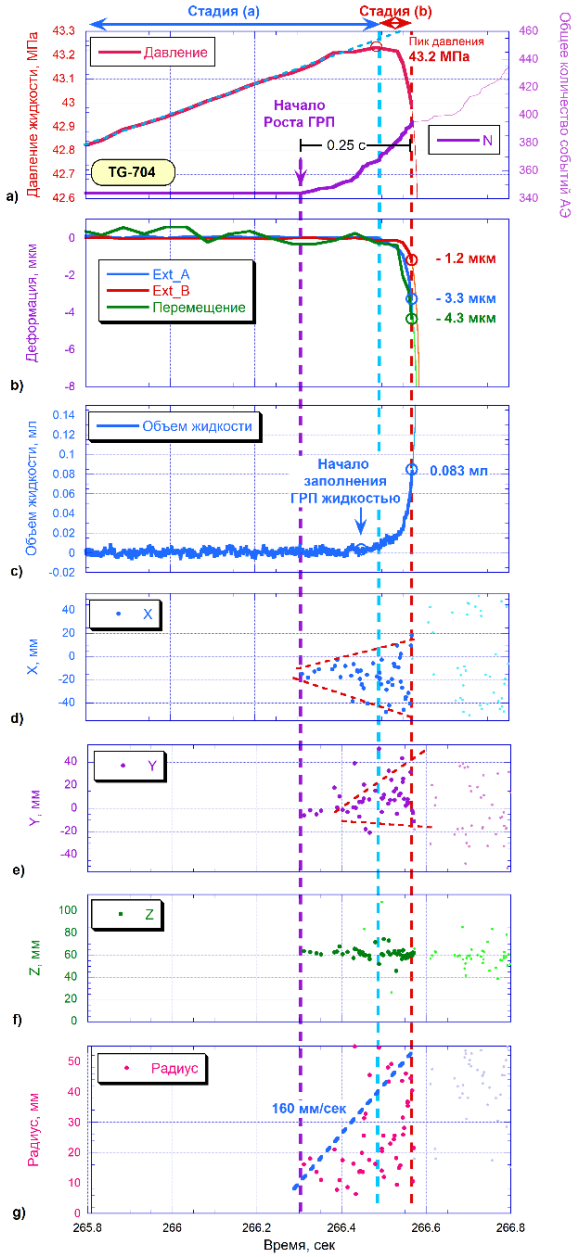


Рисунок 38. Образец TG-704: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и(e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 38c демонстрирует объем жидкости, поступившей в трещину. Весь объем закачиваемой в образец жидкости можно разделить на две составляющие: линейно увеличивающийся объем жидкости, который связан со сжимаемостью породы и жидкости, упругим расширением гидравлической системы закачки из-за увеличения давления, и нелинейно увеличивающийся объем жидкости, связанный с процессом заполнения пор, природных трещин и непосредственно трещины гидроразрыва [Bobrova и др., 2021;

Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015]. Этот расчетный параметр был получен путем вычитания линейно возрастающей составляющей объема жидкости из общего объема жидкости, закачиваемой в образец. Объем жидкости в трещине гидроразрыва в момент, когда трещина достигает поверхности образца, составляет 0,083 мл (Рисунок 38c).

Распределение координат зарегистрированных событий АЭ (Рисунок 38d, e) показывает, что трещина гидроразрыва распространялась асимметрично; преобладал однонаправленный рост в плоскостях X и Y. Положение зарегистрированных событий АЭ в вертикальной плоскости Z было приблизительно на уровне участка открытой секции скважины (40-60 мм от основания) (Рисунок 38f).

Последний из представленных графиков (Рисунок 38g) демонстрирует распределение расстояний между скважиной (центром образца) и координатами соответствующих сигналов акустической эмиссии (АЭ), демонстрируя распространение во времени облака зарегистрированных событий АЭ от центра образца к его поверхности (по радиусу), а линейный тренд указывает момент, когда трещина гидроразрыва выходит на цилиндрическую поверхность. Скорость распространения трещины гидроразрыва была определена по данным АЭ и составила около 160 мм/сек (Рисунок 38g). Важно отметить, что трещина достигла поверхности образца после регистрации максимального давления.

Рисунок 39 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий эксперимента гидроразрыва. Положение сигналов АЭ представлено в виде сфер, цвет которых соответствует времени, показанной на шкале в нижней части каждой проекции. Проекции «вид сверху» (Рисунок 39) описывают геометрию и направление распространения трещины, которые были выявлены на основе положения залоцированных событий АЭ. На стадии (a), перед падением давления в стволе скважины, в северо-западном секторе наблюдаются несколько единичных акустических событий. На стадии (b) было зафиксировано увеличение числа акустических событий с сохранением северо-западного направления распространения. Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует полное рассеяние событий АЭ по всему поперечному сечению.

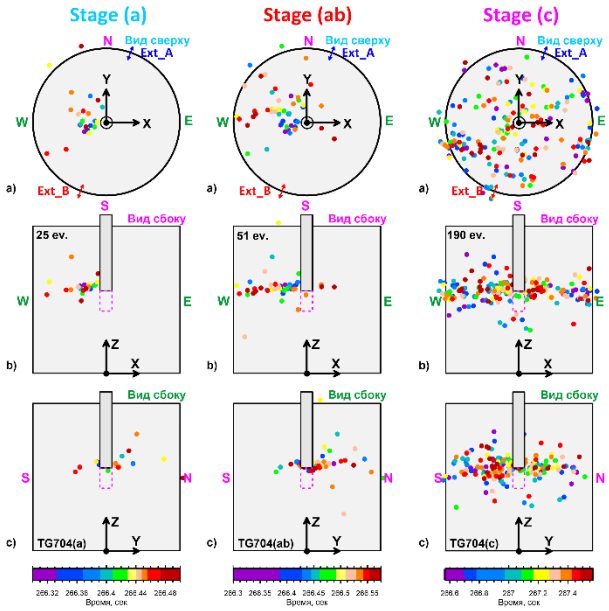


Рисунок 39. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца TG-704.

Проекции «вид сбоку» образца TG-704 (Рисунок 39) также подтверждают однонаправленное (северо-западное) распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении. Локализация событий АЭ хорошо сопоставима с созданной трещиной (Рисунок 40).

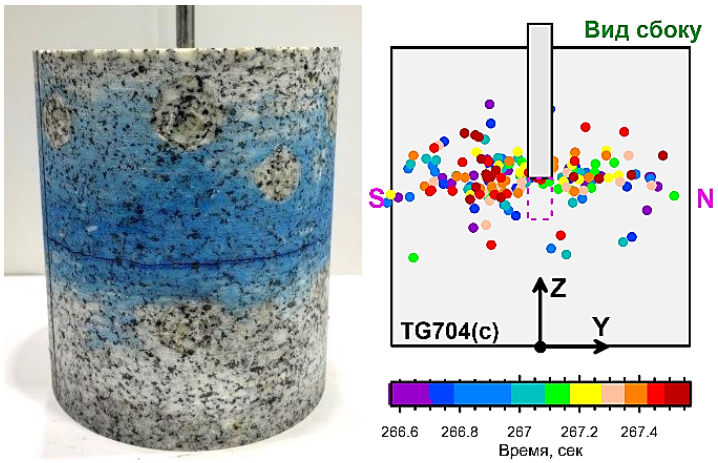


Рисунок 40. Образец TG-704 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

3.1.1.2 Линейный гель (ЛГ)

Образец WG-705

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии. Стадия (a) описывает зарождение и распространение трещины до момента, когда трещина достигнет цилиндрической поверхности образца (синяя вертикальная пунктирная линия). Этот момент был определен по данным АЭ. Стадия (b) завершается в момент достижения максимального давления жидкости в скважине (красная вертикальная

пунктирная линия). Стадия (c) демонстрирует процесс падения давления в скважине и последующее смыкание стенок трещины. Рисунок 41 подробно описывает параметры, зарегистрированные во время распространения трещины гидроразрыва в образце WG-705.

Возникновение акустической активности наблюдалось на 313,20 секунде эксперимента (Рисунок 41a, фиолетовая кривая). Этот момент, отмеченный на графике зеленой вертикальная пунктирной линией, произошел за 1,70 секунды до достижения максимального давления жидкости. Красная кривая (Рисунок 41a) описывает увеличение давления жидкости гидроразрыва с максимальным значением, равным 77,4 МПа. Оно было зарегистрировано на 314,90 секунде эксперимента и отмечено на графике красной вертикальной пунктирной линией. После достижения пикового значения происходит быстрое падение давления в скважине.

Рисунок 41b демонстрирует положение поршня во время эксперимента (зеленая кривая). В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано равным 4,3 мкм (Рисунок 41b, зеленый). Экстензометр, обозначенный Ext_A, измерил удлинение образца приблизительно на 1,3 микрона (Рисунок 41b, синяя кривая) в момент, когда трещина достигла поверхности образца. В тот же момент времени экстензометр Ext_B зафиксировал раскрытие трещины, близкое к 0 (Рисунок 41b, красная кривая). На основании измеренных деформаций, можно предположить, что трещина распространялась асимметрично, главным образом в направлении датчика деформации Ext_A.

Рисунок 41c демонстрирует объем закачанной в трещину жидкости гидроразрыва. В момент, когда трещина достигла поверхности образца, объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, был равен 0,02 мл.

Анализ распределения горизонтальных X и Y координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 41d,e) подтверждает предположение, сделанное на основе измерений деформации, о том, что трещина распространялась асимметрично, а именно, в основном в направлениях положительных значений координат X и Y. Распределение координат событий АЭ в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (35-40 мм от основания образца) (Рисунок 41f).

Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости распространения трещины гидроразрыва, варьировалась от 25 до 55 мм/сек, ускоряясь к тому времени, когда трещина достигает поверхности образца (Рисунок 41g).

Образец TG-703.

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии. Стадия (a) была определена по данным АЭ, а именно по количеству

залоцированных акустических сигналов: на данной стадии было зарегистрировано 133 сигнала, что является половиной от количества сигналов, зарегистрированных на стадии (b) (синяя вертикальная пунктирная линия). Стадия (b) завершается в момент достижения трещиной боковой поверхности образца (красная вертикальная пунктирная линия). Этот момент также был определен по данным АЭ. Стадия (c) демонстрирует процесс падения давления в скважине и последующее смыкание стенок трещины. Рисунок 41 подробно описывает параметры, зарегистрированные во время распространения трещины гидроразрыва в образце TG-703.

Возникновение акустической активности наблюдалось на 179,10 секунде эксперимента (Рисунок 41h, фиолетовая кривая). Этот момент, отмеченный на графике фиолетовой вертикальной пунктирной линией, произошел за 1,05 секунды до достижения максимального давления жидкости. Красная кривая (Рисунок 41h) описывает увеличение давления жидкости гидроразрыва с максимальным значением, равным 56,9 МПа. Оно было зарегистрировано на 180,15 секунде эксперимента и отмечено на графике красной вертикальной пунктирной линией. После достижения пикового значения происходит быстрое падение давления в скважине.

Рисунок 41i демонстрирует положение поршня во время эксперимента (зеленая кривая). В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано равным 4,4 микрона (Рисунок 41i, зеленый). Экстензометр, обозначенный Ext_A, измерил удлинение образца приблизительно на 3,3 микрона (Рисунок 41i, синяя кривая) в момент, когда трещина достигла поверхности образца. В тот же момент времени экстензометр Ext_B зафиксировал удлинение, связанное с раскрытием трещины, близкое к 2,5 микронам (Рисунок 41i, красная кривая). На основании измеренных деформаций, можно предположить, что трещина распространялась асимметрично, главным образом в направлении датчика деформации Ext_A.

Рисунок 41j демонстрирует объем закачанной в трещину жидкости гидроразрыва. В момент, когда трещина достигла поверхности образца, объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, был равен 0,06 мл.

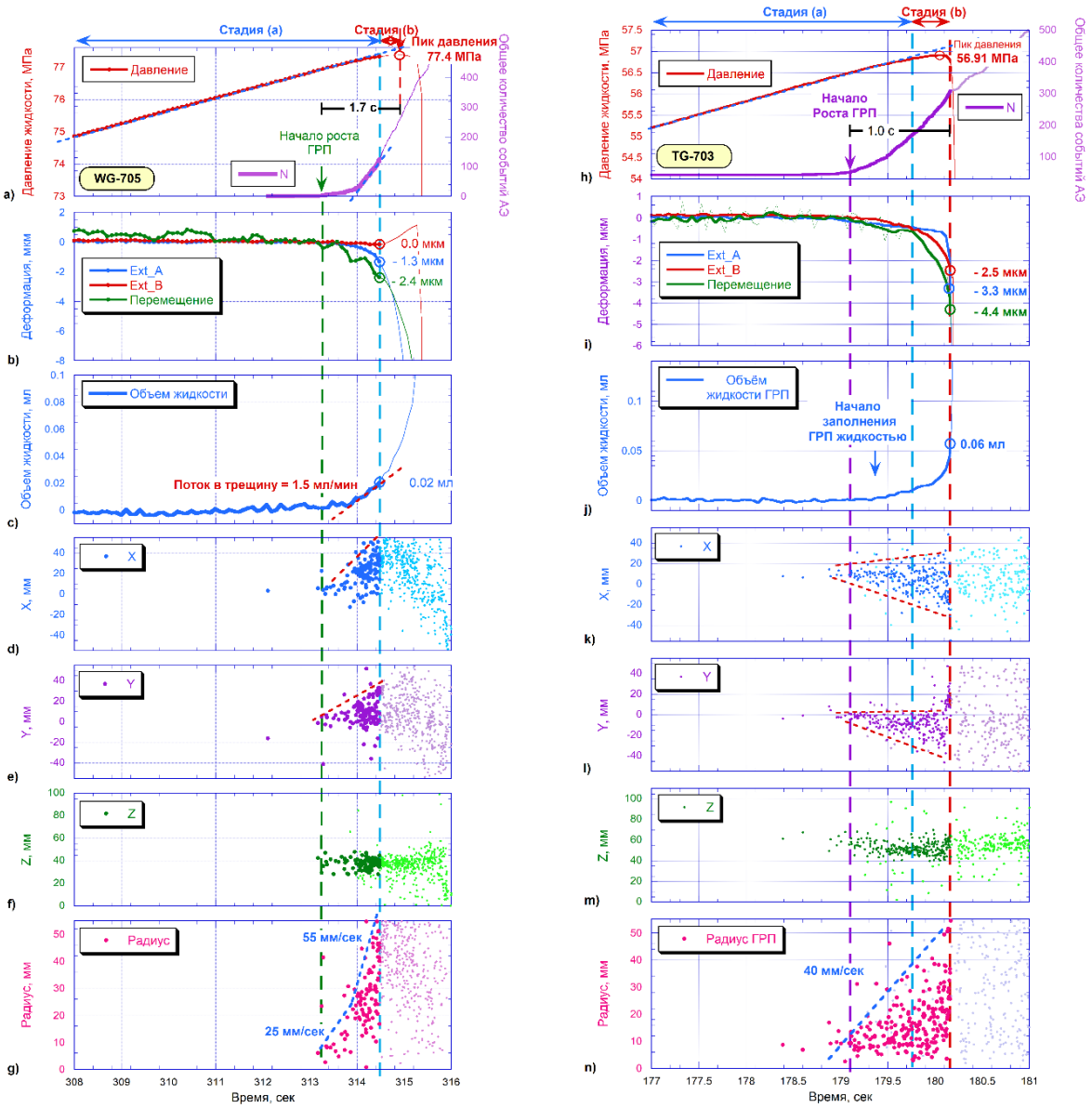


Рисунок 41. Образцы WG-705 (слева) и TG-703 (справа): (a), (h) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (i) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c), (j) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d), (k) и (e), (l) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f), (m) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g), (n) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Анализ распределения горизонтальных X и Y координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 41k,l) подтверждает предположение, сделанное на основе измерений деформации, о том, что трещина распространялась асимметрично, в основном в направлениях положительных значений координат X и Y. Распределение координат событий АЭ в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (50-60 мм от основания образца) (Рисунок 41m). Скорость

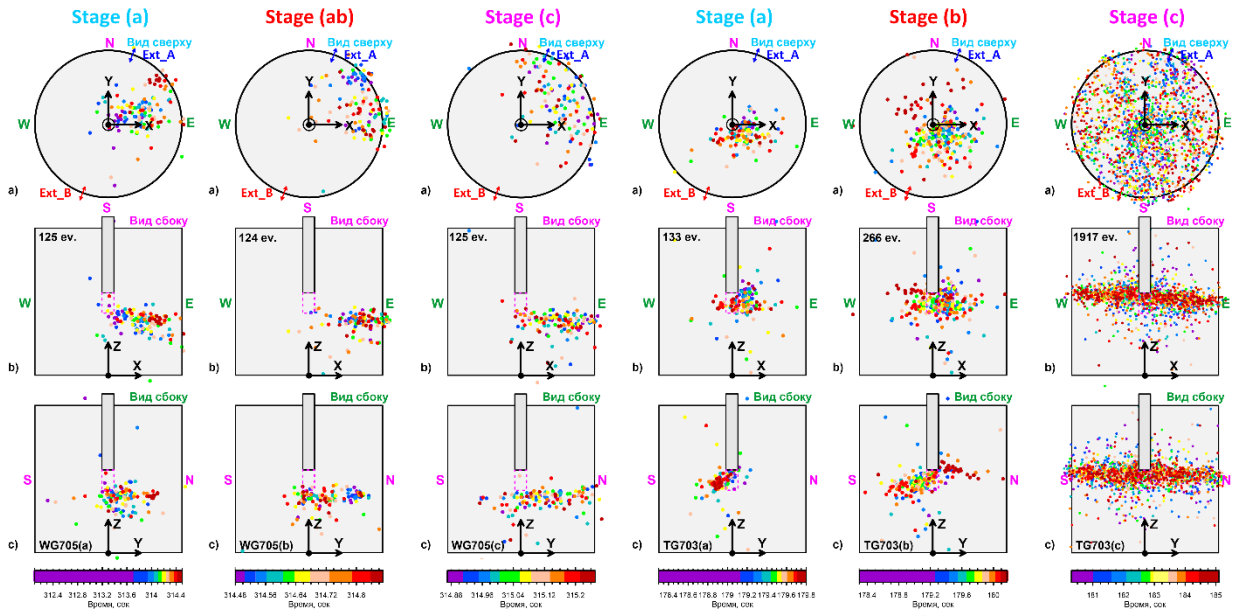
распространения трещины гидроразрыва была определена по данным АЭ и составила 40 мм/сек (Рисунок 41n).

Рисунок 42a демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий гидроразрыва. Положение сигналов АЭ представлено в виде сфер, цвет которых соответствует времени, показанной на шкале в нижней части каждой проекции. Проекции «вид сверху» на координаты инициированных событий АЭ показывает увеличение сектора распространения трещины с течением времени.

В образце WG-705 (Рисунок 42a) на стадии (a) наблюдается скопление небольшого числа акустических событий в восточном, северо-восточном секторе. На стадии (b) было зарегистрировано бóльшее количество акустических событий, которые занимают почти 1/4 площади поперечного сечения образца. Преобладающим направлением распространения трещины также является северо-восточный сектор. Окончание стадии (b) соответствует достижению трещины гидроразрыва поверхности образца. На стадии (c) события АЭ уже занимают почти 1/3 всей площади поперечного сечения. Рисунок 42a подтверждает однонаправленный рост трещины на стадии (a) только в узком секторе, а последующие стадии (b) и (c) показывают дальнейшее расширение трещины в горизонтальном направлении, приводящее к увеличению площади трещины гидроразрыва.

Проекции «вид сбоку» образца WG-705 (Рисунок 42a) также подтверждают однонаправленное (северо-восточное) распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении. Локализация событий АЭ хорошо сопоставима с созданной трещиной Рисунок 43a.

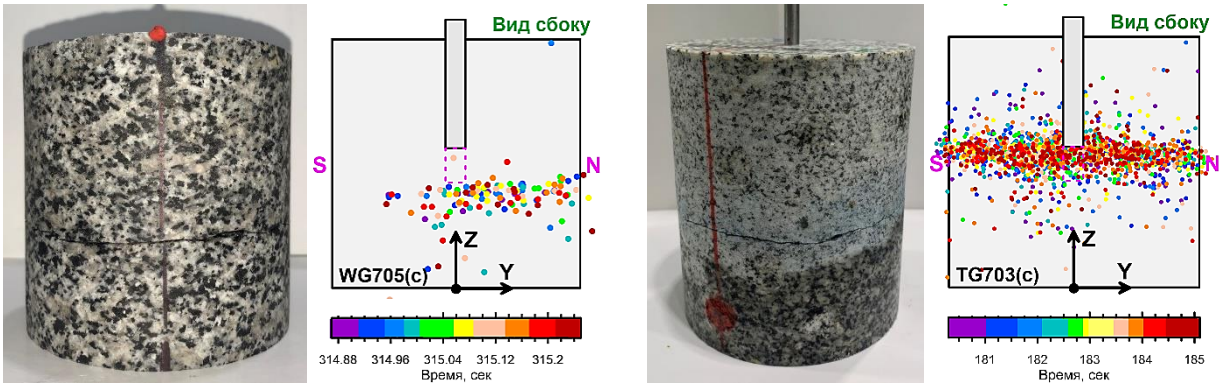
В образце TG-703 (Рисунок 42b) на стадии (a) наблюдается скопление небольшого числа акустических событий в южном, юго-восточном секторе. На стадии (b) было зарегистрировано бóльшее количество акустических событий. Преобладающим направлением распространения трещины является южная половина образца, несмотря на отдельные акустические события, зарегистрированные в северной половине. Окончание стадии (b) соответствует достижению трещины гидроразрыва поверхности образца. На стадии (c) события АЭ уже занимают всю площадь поперечного сечения и вызваны смыканием стенок трещины. Рисунок 42b подтверждает однонаправленный рост трещины на стадии (a) только в достаточно узком секторе, а последующие стадии (b) и (c) показывают дальнейшее расширение трещины в горизонтальном направлении, приводящее к увеличению площади трещины гидроразрыва.



(a) **(b)**

Рисунок 42. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов WG-705 (a) и TG-703 (b).

Проекции «вид сбоку» образца TG-703 (Рисунок 42b) также подтверждают однонаправленное (южное) распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении. Локализация событий АЭ хорошо сопоставима с созданной трещиной (Рисунок 43b).



(a) **(b)**

Рисунок 43. Образец после эксперимента и локализация событий АЭ для образцов WG-705 (a) и TG-703 (b).

3.1.1.3 Модифицированная бесполимерная жидкость гидроразрыва на основе вязкоупругого поверхностно-активного вещества отечественного производства – НЕФТЕНОЛ ВУПАВ

Образец WG-716

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии. Стадия (a) описывает зарождение и распространение трещины до момента

регистрации максимального значения давления жидкости в скважине. Стадия (b) заканчивается, когда трещина гидроразрыва достигает цилиндрической поверхности образца (оранжевая пунктирная линия). Этот момент был определен на основе АЭ. Стадия (c) демонстрирует процесс смыкания стенок трещины, который вызван увеличением значений σ_3 до значений σ_2. Рисунок 44 демонстрирует графики, описывающие параметры, зарегистрированные во время распространения трещины гидроразрыва в образце WG-716.

В образце WG-716 акустическая активность возникла на 295,00 секунде эксперимента при давлении равном 52,2 МПа (Рисунок 44, зеленая вертикальная пунктирная линия). На 295,15 секунде эксперимента было зарегистрировано максимальное давление жидкости, равное 57,3 МПа (Рисунок 44, красная вертикальная пунктирная линия). После достижения пикового значения наблюдается быстрое падение давления в скважине.

Экстензометр Ext_B зарегистрировал удлинение образца равное 0,15 мкм (Рисунок 44b, красная кривая) в момент регистрации максимального давления в стволе скважины. Объем жидкости, закачиваемой в трещину гидроразрыва, не превышал уровень шума датчика в момент максимального давления жидкости.

Распределение координат, залоцированных событий АЭ (Рисунок 44d,e), демонстрирует, что трещина распространялась почти симметрично в плоскостях X и Y. Распределение событий АЭ в вертикальной проекции показывает их локализацию на уровне участка открытой секции (50 мм от основания) (Рисунок 44f). Скорость распространения сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости распространения трещины, составляет приблизительно 100 мм/сек (Рисунок 44g).

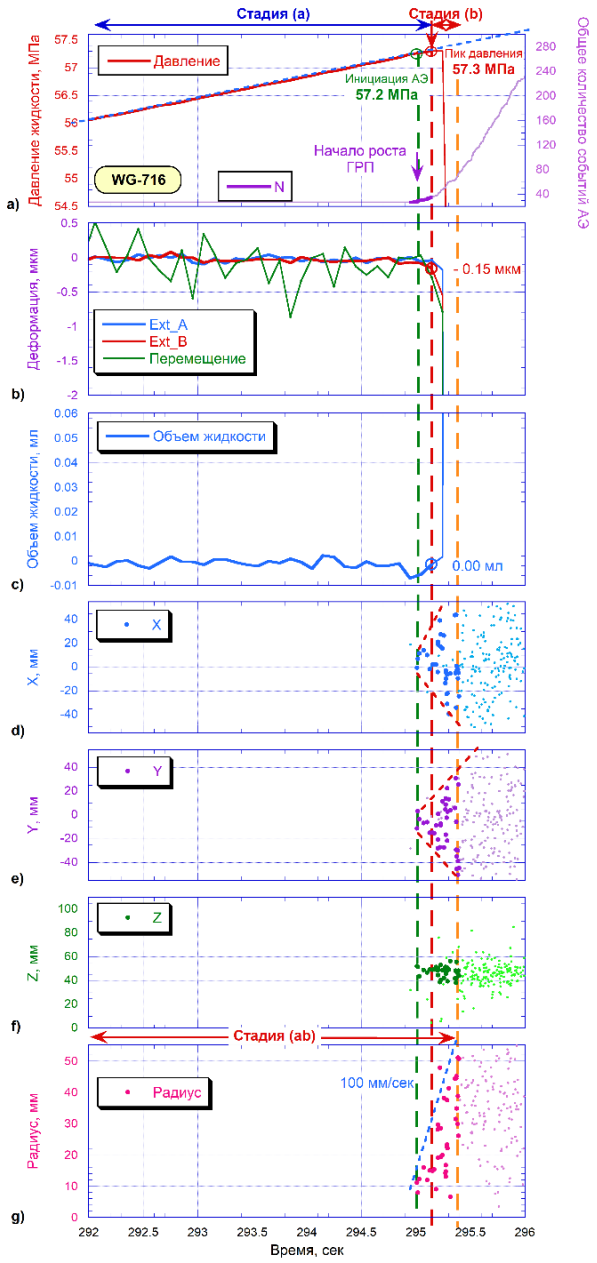


Рисунок 44. Образец WG-716: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и (e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Проекции «вид сверху» (Рисунок 45) описывают геометрию и направление распространения трещины, которое было выявлено по положению залоцированных событий АЭ. На стадии (a), в преддверии максимального давления в стволе скважины, в юго-восточном секторе наблюдаются несколько единичных акустических событий. На стадии (b) было зафиксировано увеличение числа акустических событий и почти равномерное распространение в поперечном сечении образца (в горизонтальной

плоскости). Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует полное рассеяние событий АЭ по всему поперечному сечению.

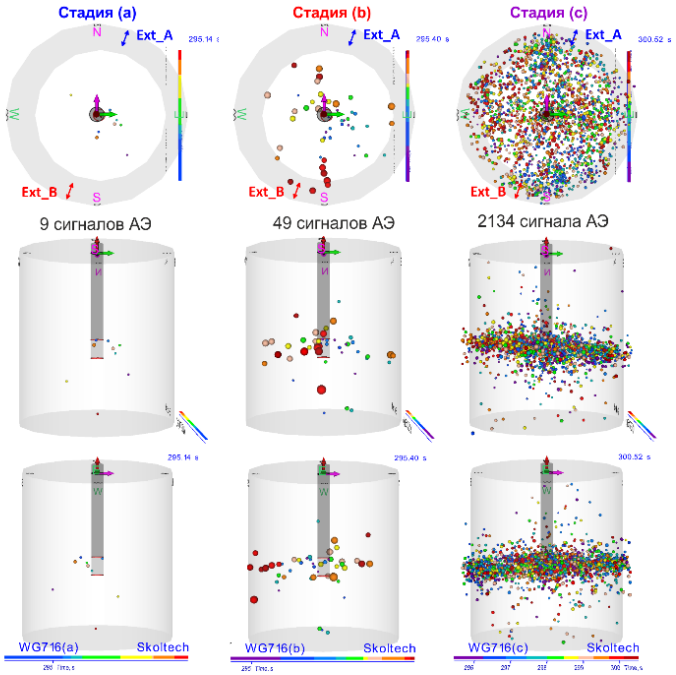


Рисунок 45. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца WG-716.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 45) подтверждают почти симметричное распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении, поскольку акустические события были зарегистрированы по обе стороны от скважины на уровне открытой секции скважины. На последней стадии эксперимента акустические события были зарегистрированы под небольшим углом. Положение залоцированных акустических событий хорошо сопоставляется с положением созданной трещины гидроразрыва (Рисунок 46).

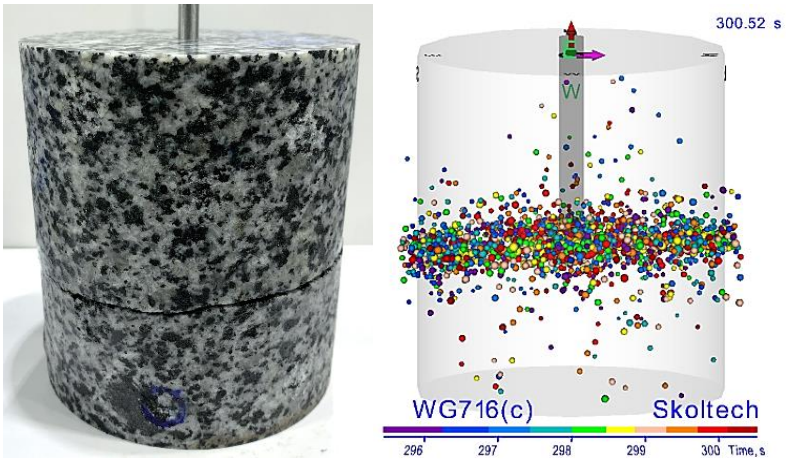


Рисунок 46. Образец WG-716 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

3.1.1.4 Жидкость гидроразрыва на основе синтетического полимера (Полигель)

Образец WG-717

Как и в предыдущих экспериментах, процесс распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии. Стадия (a) описывает начальный процесс развития трещины гидроразрыва до момента, когда закачиваемая жидкость начала заполнять трещину (синяя вертикальная пунктирная линия). Стадия (b) заканчивается в момент достижения максимального давления жидкости в скважине. Стадия (c) – стадия смыкания стенок трещины гидроразрыва. Рисунок 47 демонстрирует графики, описывающие параметры трещины гидроразрыва, зарегистрированные в образце WG-717.

В образце WG-717 на 281,58 секунде эксперимента наблюдалось возникновение акустической активности (Рисунок 47a, фиолетовый). Этот момент (фиолетовая вертикальная пунктирная линия) произошел при давлении жидкости равном 71,3 МПа, за 1,15 секунды до регистрации максимального давления жидкости (Рисунок 47a, красный). Пик давления жидкости, равный 71,7 МПа, был зарегистрирован на 282,73 секунде эксперимента (красная вертикальная пунктирная линия). Следует отметить, что временно́й интервал от возникновения трещины, который соответствует моменту активации АЭ, до регистрации максимального давления жидкости в этом эксперименте намного больше, чем в предыдущем (для WG-716 он был зафиксирован всего за 0,15 секунды). Датчик положение поршня (Рисунок 47b, зеленый) указывает на бóльшее удлинение образца – примерно на 2,2 мкм, чем в предыдущем эксперименте WG-716. Объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, составляет около 0,017 мл (Рисунок 47c).

Распределение координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 47d, e) показывает, что трещина гидроразрыва распространялась асимметрично; преобладал однонаправленный рост в плоскостях X и Y. Положение зарегистрированных событий АЭ в вертикальной плоскости Z было приблизительно на уровне участка открытой секции скважины (48 мм от основания) (Рисунок 47f). Важно отметить, что в отличие от образца WG-716, где трещина гидроразрыва достигла поверхности образца после регистрации пика давления гидроразрыва, в эксперименте WG-717 трещина достигла поверхности практически одновременно с регистрацией максимального давления. Скорость распространения трещины гидроразрыва была определена по данным АЭ и составила 40 мм/сек (Рисунок 47 g).

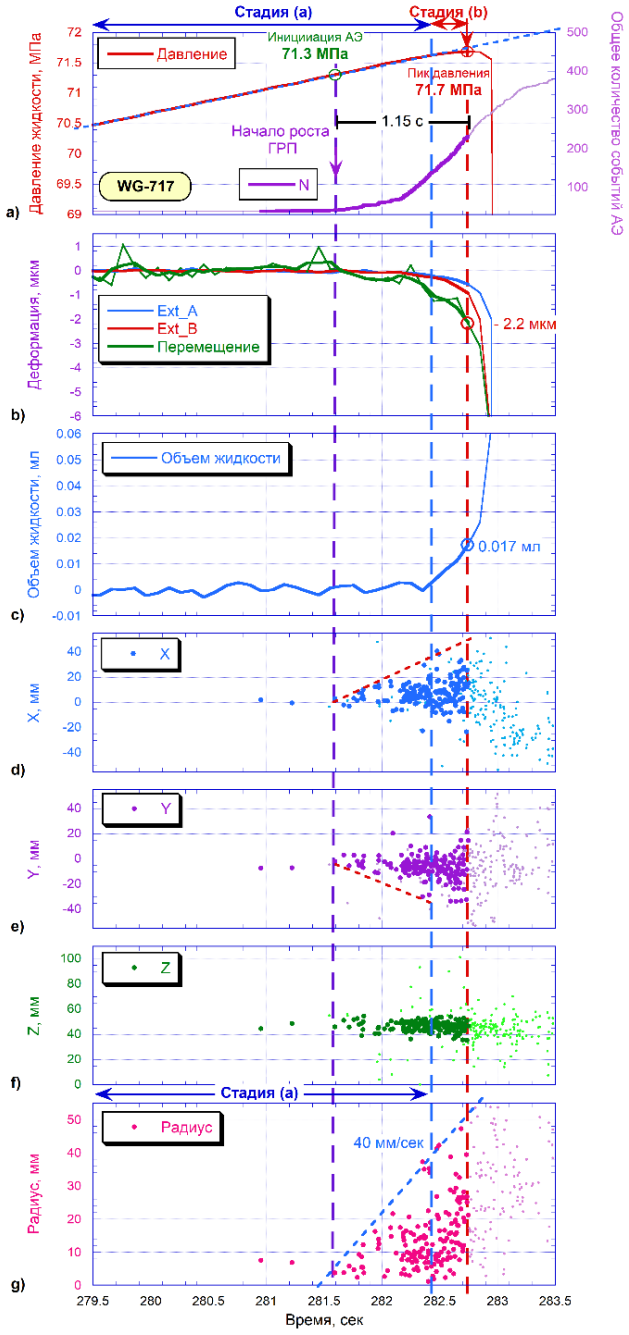


Рисунок 47. Образец WG-717: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и (e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 48 демонстрирует три ортогональные проекции зарегистрированных сигналов АЭ. На стадии (a), а именно в момент, когда жидкость начала поступать в трещину гидроразрыва, наблюдается небольшое скопление акустических событий в юго-восточном секторе. На стадии (b), в момент регистрации пика давления жидкости в стволе скважины,

было локализовано бóльшее количество акустических событий, которые заняли 1/3 площади поперечного сечения образца. Преобладающим направлением распространения трещины также является юго-восточный сектор. Стадия (c) показывает процесс закрытия трещины, события АЭ зарегистрированы по всей площади поперечного сечения.

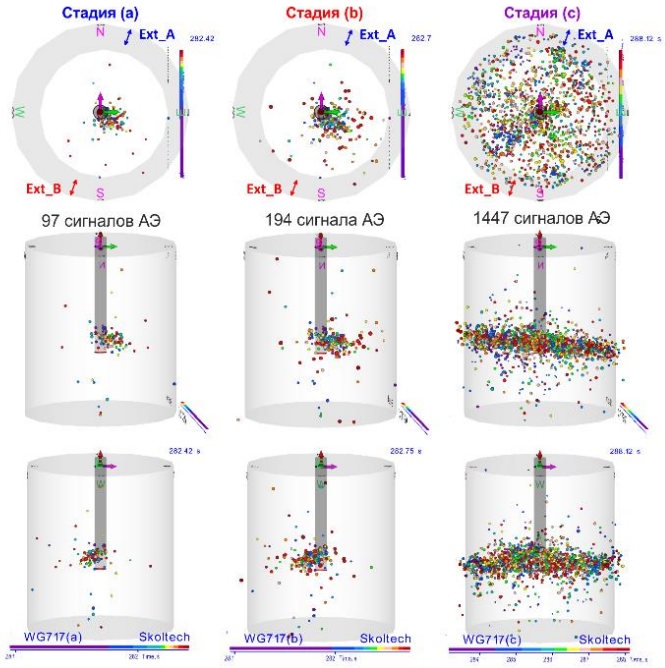


Рисунок 48. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца WG-717.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 48) подтверждают почти однонаправленное (юго-восточное) распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении на первых двух стадиях. Только на последней стадии эксперимента события АЭ были локализованы по обе стороны скважины примерно на уровне открытой секции скважины. Локализация событий АЭ вполне сопоставима с положением созданной трещины (Рисунок 49).

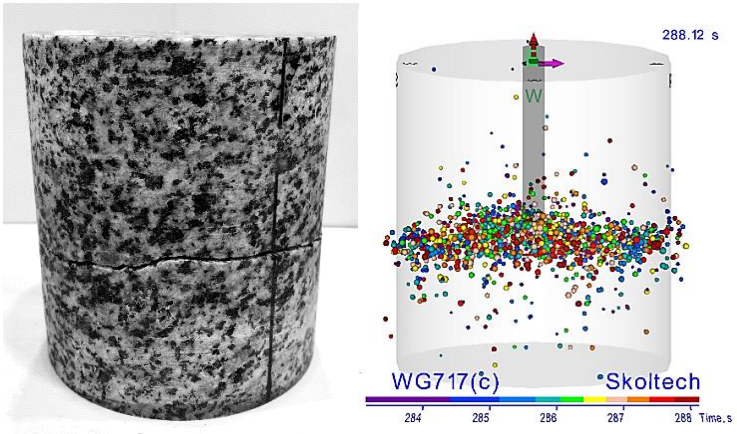


Рисунок 49. Образец WG-717 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

3.1.2 Безводные жидкости гидроразрыва

3.1.2.1 Дизельная система 1 (ДС-1) (Химеко Т)

Образец WG-706

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва также, как и в предыдущих экспериментах, был разделен на стадии. Стадия (a) описывает процесс роста трещины до момента достижения максимального значения давления жидкости в скважине. Стадия (b) завершается, когда достигается наибольшее осевое удлинение образца, связанное с раскрытием трещины гидроразрыва, и начинается увеличение значений σ_3 до значений σ_2. Стадия (c) описывает падение давления жидкости и последующее смыкание стенок образовавшейся трещины. Рисунок 50 демонстрирует графики и подробное описание представленных на них параметров, зафиксированных при распространении трещины гидроразрыва в образце WG-706.

В образце WG-706 на 342,90 секунде эксперимента наблюдалось возникновение акустической эмиссии (Рисунок 50, фиолетовая кривая), являющееся следствием инициации трещины гидроразрыва, которое произошло за 1,80 секунды до достижения максимального давления, равного 65,7 МПа (Рисунок 50, красная вертикальная пунктирная линия). Падение давления в скважине наблюдается после достижения пикового значения.

В момент регистрации максимального давления жидкости в образце было зафиксировано удлинение на 2,4 микрона (Рисунок 50b, зеленый). В это же время экстензометр Ext_A зарегистрировал удлинение образца примерно на 1,2 микрона (Рисунок 50b, синяя кривая). Экстензометр Ext_B зафиксировал в то же время гораздо меньшее раскрытие трещины, близкое к 0,2 микронам (Рисунок 50b, красная кривая). Основываясь на измерениях деформации, можно предположить, что трещина распространялась асимметрично, главным образом в направлении датчика деформации Ext_A. Объем жидкости в трещине гидроразрыва в момент регистрации максимального давления составил 0,015 мл (Рисунок 50c).

Анализ распределения горизонтальных X и Y координат залоцированных событий АЭ в образце WG-706 (Рисунок 50d,e) подтверждает асимметричное распространение трещины, в основном смещенное в сторону отрицательных значений координат X. Распределение событий АЭ в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (50 мм от основания образца) (Рисунок 50f). Скорость распространения трещины гидроразрыва была определена по данным АЭ и составила 25 мм/сек (Рисунок 50g).

Образец WG-708

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва также, как и в предыдущих экспериментах, был разделен на стадии. Стадия (a) описывает начальную стадию распространения трещины гидроразрыва до момента, когда закачиваемая жидкость начала заполнять трещину (синяя вертикальная пунктирная линия). Стадия (b) завершается при достижении максимального значения давления жидкости в скважине. Этот момент практически совпадает с достижением трещиной гидроразрыва боковой поверхности образца. Стадия (c) описывает падение давления жидкости и последующее смыкание стенок образовавшейся трещины гидроразрыва. Рисунок 50 демонстрирует графики и подробное описание представленных на них параметров, зафиксированных при распространении трещины гидроразрыва в образце WG-708.

В образце WG-708 возникновение акустической активности (Рисунок 50h, фиолетовая кривая) наблюдалось на 277,00 секунде эксперимента. Этот момент (зеленая вертикальная пунктирная линия) произошел за 1,60 секунды до достижения максимального давления, равного 65,5 МПа (Рисунок 50h, красная кривая). Падение давления в скважине наблюдается после достижения пикового значения.

В момент, когда трещина достигла цилиндрической поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано равным 4,4 микрона (Рисунок 50i, зеленый). В этот же момент времени, экстензометр Ext_A зарегистрировал удлинение образца приблизительно на 4,2 микрона (Рисунок 50i, синяя кривая), а экстензометр Ext_B – на 1,6 микрона (Рисунок 50i, красная кривая). Основываясь на измерениях деформации, можно предположить, что трещина распространялась асимметрично, главным образом в направлении датчика деформации Ext_A.

Объем жидкости в трещине в момент, когда трещина достигает поверхности образца, составляет 0,043 мл (Рисунок 50j). Анализ распределений горизонтальных X и Y координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 50k,l) также подтверждает асимметричное распространение трещины, в основном смещенное в сторону положительных значений координат X. Однако, по сравнению с закачкой ЛГ и L-CO_2, распределение сигналов АЭ вряд ли можно назвать однонаправленным, поскольку распространение трещины гидроразрыва происходило в довольно широком секторе. Распределение событий АЭ в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (50 мм от основания образца) (Рисунок 50m). Скорость роста трещины составляет 20 м/сек (Рисунок 50n), что меньше, чем при закачке в качестве жидкости гидроразрыва ЛГ и L-CO_2.

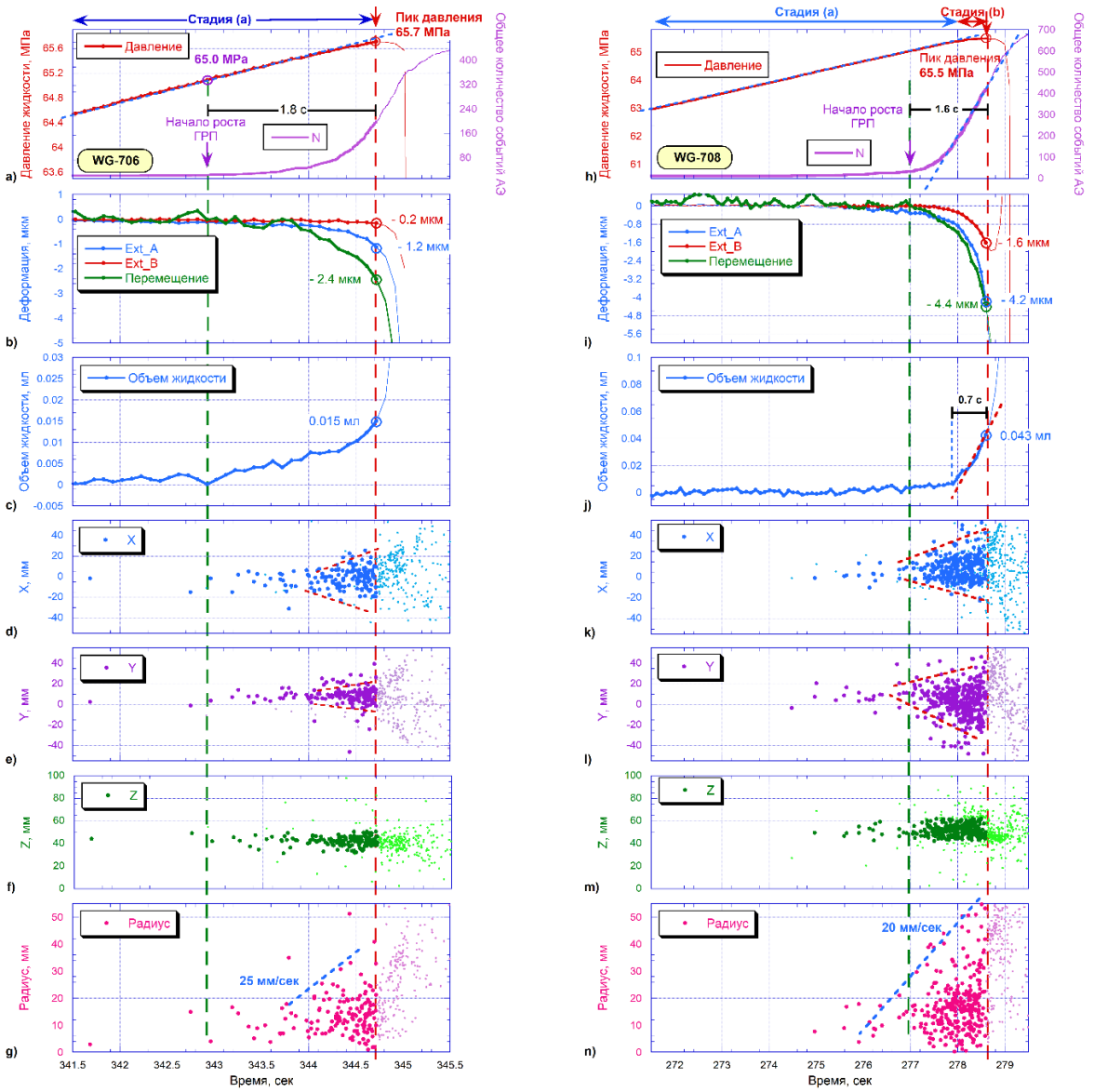


Рисунок 50. Образец WG-706 (слева) и образец WG-708 (справа): (a), (h) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (i) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c), (j) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d), (k) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости X; (e), (l) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Y; (f), (m) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g), (n) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 51 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов в пространстве для трех стадий эксперимента. Рисунок 51 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий эксперимента. В образце WG-706 на стадии (a) было зарегистрировано небольшое количество акустических событий недалеко от скважины, смещенное в северо-западном направлении. На стадии (b) было

зарегистрировано бóльшее количество акустических событий, которые охватывают почти всю площадь поперечного сечения образца. Стадия (c) показывает распространение значительно большего числа событий АЭ почти по всему поперечному сечению. Проекции «вид сбоку» с залоцированными событиями АЭ (Рисунок 51) подтверждают практически однонаправленное распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении на стадии (a). Последующее распространение трещины преобладает в восточной половине поперечного сечения образца на стадии (b). Стоит отметить, что на начальной стадии (a) трещина имеет близкую к радиальной форму, но смещена относительно скважины в северо-западном направлении. Проекции «вид сбоку» (Рисунок 51) также подтверждают однонаправленное раскрытие трещины гидроразрыва на начальной стадии (a). Локализация событий АЭ хорошо сопоставима с созданной трещиной (Рисунок 52).

В образце WG-708 проекции «вид сверху» (Рисунок 51) на координаты событий АЭ показывают расширение сектора распространения трещины во времени. На стадии (a) незначительное количество акустических событий было зарегистрировано рядом со скважиной, преобладающим направлением распространения которых является северо-восточное направление.

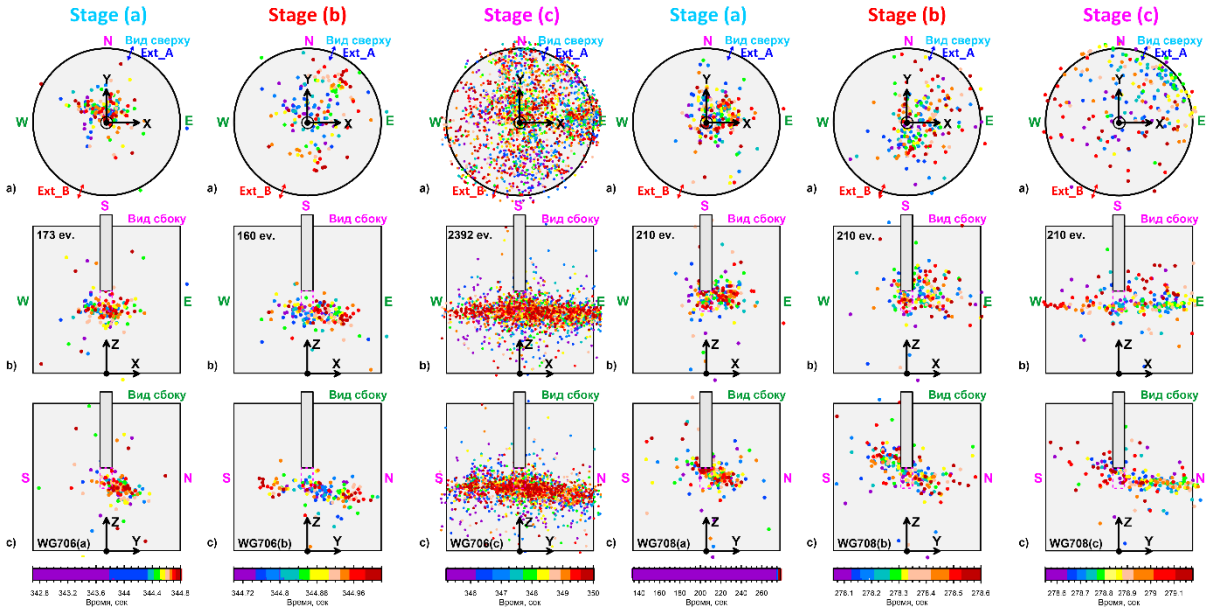


Рисунок 51. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов WG-706 (слева) и WG-708 (справа).

На стадии (b) было зарегистрировано большее количество акустических событий, которые занимают приблизительно 1/2 площади поперечного сечения образца (восточная половина). На стадии (c) акустические события были зарегистрированы по всей площади поперечного сечения, и вызваны процессом смыкания стенок трещины гидроразрыва. Проекции «вид сбоку» (Рисунок 51) подтверждают однонаправленность распространения трещины гидроразрыва на стадии (a) и последующее распространение трещины

преимущественно в восточной половине поперечного сечения образца на стадии (b). Локализация событий АЭ хорошо сопоставима с инициированной во время эксперимента трещиной гидроразрыва (Рисунок 52).

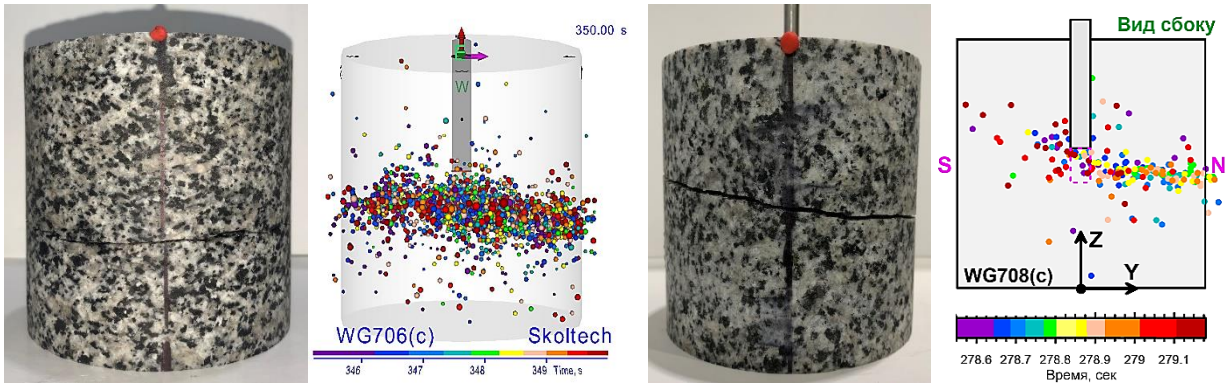


Рисунок 52. Образец WG-706 (слева) и образец WG-708 (справа): фотография образца после эксперимента и локализация событий АЭ.

3.1.2.2 Дизельная система 3 (ДС-3) (Химеко Н)

Образец WG-721

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии аналогично образцу WG-708. Рисунок 53 демонстрирует графики, описывающие распространение трещины гидроразрыва в образце WG-721.

В образце WG-721 на 299,10 секунде эксперимента наблюдалось увеличение числа акустических событий (Рисунок 53, фиолетовая кривая), что произошло за 3,50 секунды до регистрации максимального значения давления жидкости гидроразрыва, равного 39,9 МПа (Рисунок 34,a, красная кривая). Экстензометр Ext_A (Рисунок 53b, голубая кривая) указывает на удлинение образца всего на 0,2 микрона, в то же время экстензометр Ext_B (Рисунок 53b, красная кривая) зарегистрировал значительно бóльшую осевую деформацию, составляющую 4,0 микрона. Датчик перемещения поршня (Рисунок 53b, зеленая кривая) позволил измерить удлинение, равное 2,0 микронам, что близко к среднему значению между двумя измерениями экстензометров. Анализ осевых деформаций образца, независимо измеренных двумя экстензометрами, симметрично установленными на цилиндрической поверхности образца, демонстрирует сильно асимметричное распространение трещины.

Жидкость гидроразрыва начала поступать в трещину гидроразрыва через несколько секунд после инициации трещины. Объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, составил 0,026 мл (Рисунок 53c, голубая кривая).

Распределение координат зарегистрированных событий АЭ также подтверждает, что трещина распространяется асимметрично (в области, ограниченной красными горизонтальными пунктирными линиями). Однонаправленный рост трещины

гидроразрыва преобладал в области отрицательных значений осей X и Y (Рисунок 53d,e). В вертикальной плоскости Z сигналы АЭ были локализованы на уровне участка открытой секции (47 мм от основания) (Рисунок 53f). Скорость распространения трещины гидроразрыва была определена по данным АЭ и составила 15 мм/сек (Рисунок 53g).

Образец TG-717

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии. Стадия (a) была определена по данным АЭ, а именно по количеству залоцированных акустических сигналов: на данной стадии было зарегистрировано 197 сигналов, что является половиной от количества сигналов, зарегистрированных на стадии (b) (синяя вертикальная пунктирная линия). Стадия (b) завершается в момент достижения трещиной гидроразрыва цилиндрической поверхности образца (синяя пунктирная линия). Стадия (c) демонстрирует процесс падения давления в скважине и последующее смыкание стенок трещины. Рисунок 53 подробно описывает параметры, зарегистрированные во время распространения трещины гидроразрыва в образце TG-717.

Возникновение акустической активности наблюдалось на 215,80 секунде эксперимента (Рисунок 53h, фиолетовая кривая). Этот момент, отмеченный на графике фиолетовой вертикальной пунктирной линией, произошел за 1,00 секунду до достижения максимального давления жидкости. Красная кривая (Рисунок 53h) описывает увеличение давления жидкости гидроразрыва с максимальным значением, равным 59,4 МПа. Оно было зарегистрировано на 216,80 секунде эксперимента и отмечено на графике красной вертикальной пунктирной линией. После достижения пикового значения происходит быстрое падение давления в скважине.

Рисунок 53i демонстрирует положение поршня во время эксперимента (зеленая кривая). В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано равным 13,5 микронам (Рисунок 53i, зеленая кривая). Экстензометр, обозначенный Ext_A, измерил удлинение образца приблизительно на 6,4 микрона (Рисунок 53i, синяя кривая) в момент, когда трещина достигла поверхности образца. В тот же момент времени экстензометр Ext_B зафиксировал удлинение образца на 8,2 микрона (Рисунок 53i, красная кривая). На основании измеренных деформаций, можно предположить, что трещина распространялась практически симметрично.

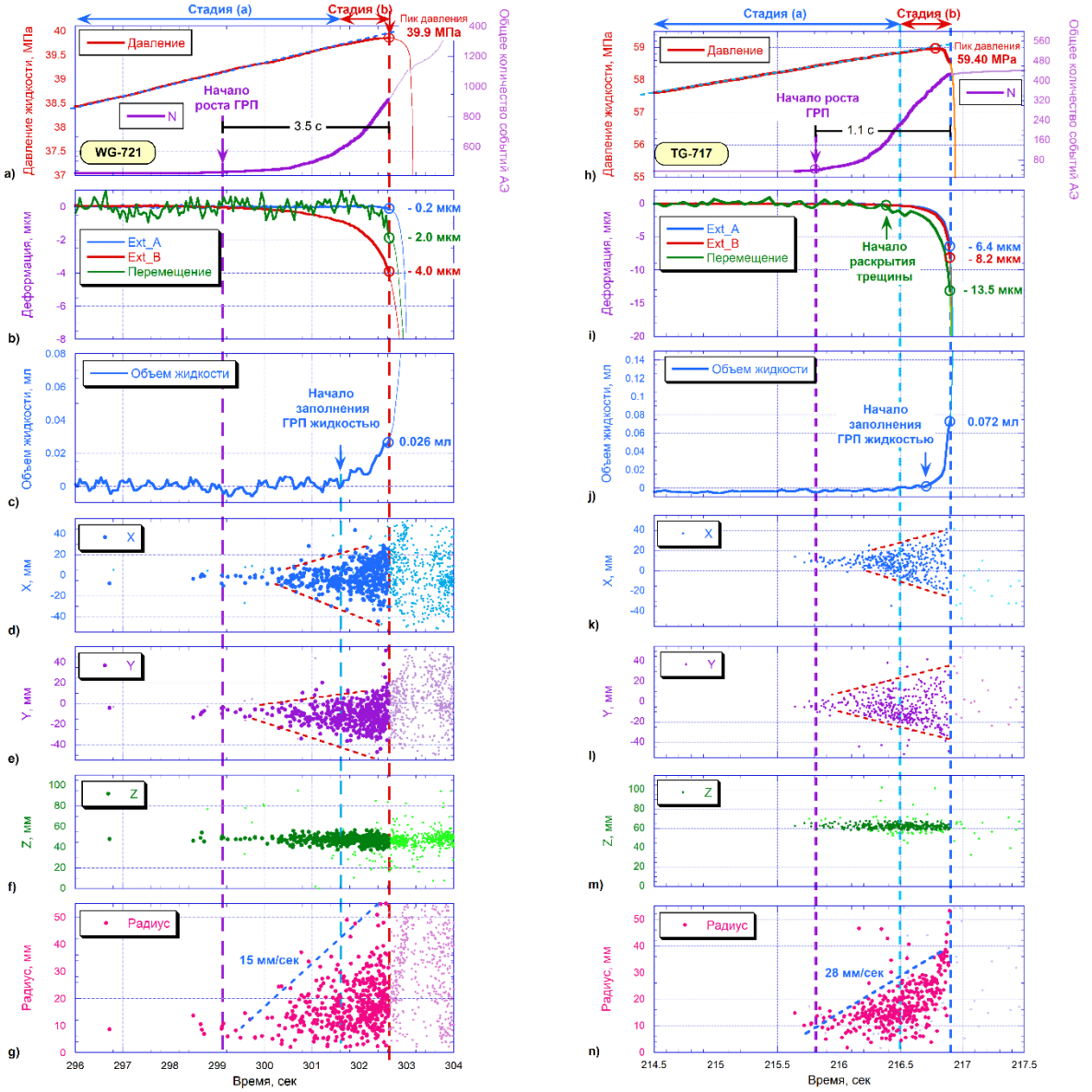


Рисунок 53. Образцы WG-721 (слева) и TG-717 (справа): (a), (h) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (i) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c), (j) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d), (k) и (e), (l) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f), (m) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g), (n) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 53j демонстрирует объем закачанной в трещину жидкости гидроразрыва. В момент, когда трещина достигла поверхности образца, объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, был равен 0,072 мл.

Анализ распределения горизонтальных X и Y координат локализованных событий АЭ (Рисунок 53k,l) подтверждает предположение, сделанное на основе измерений деформации, о том, что трещина распространялась практически симметрично.

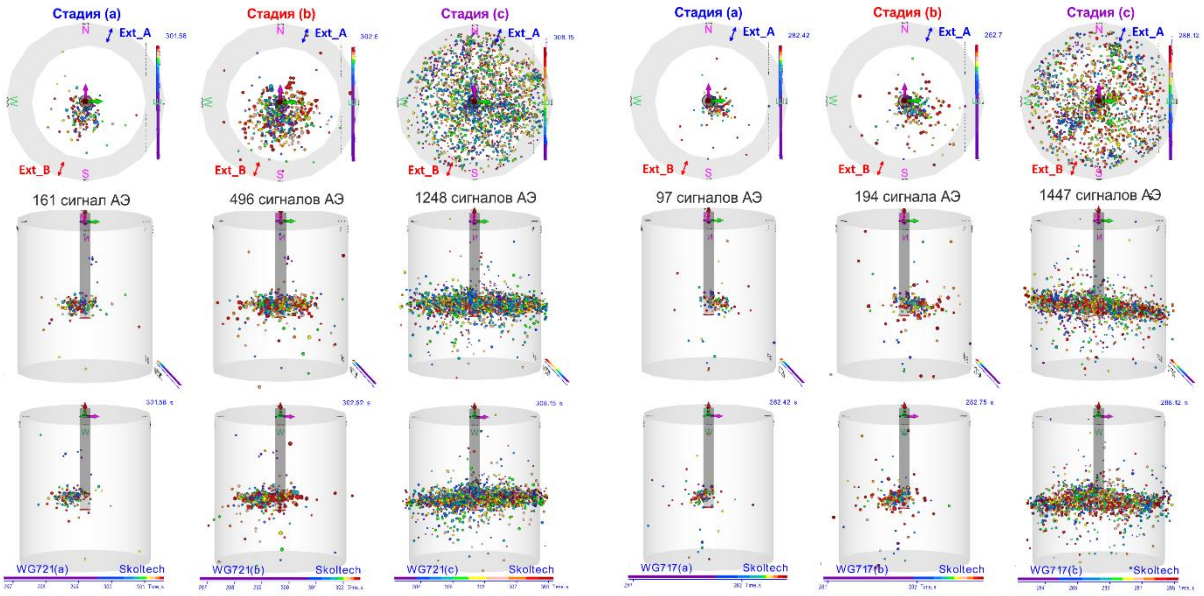
Распределение координат событий АЭ в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (60 мм от основания образца) (Рисунок 41m). Скорость распространения трещины гидроразрыва была определена по данным АЭ и составила 28 мм/сек (Рисунок 53n).

Рисунок 54a демонстрирует три ортогональные проекции положений зарегистрированных сигналов АЭ в образце WG-721. Проекции «вид сверху» отображают почти радиальное распространение трещины, несколько смещенное в южном направлении. На стадии (a) наблюдается почти однонаправленное распространение акустических событий с преобладанием юго-западного направления. На стадии (b) наблюдается радиальное облако событий АЭ, смещенное в юго-западном направлении, и только несколько событий были зарегистрированы в северном направлении. Кроме того, асимметричный рост трещины был подтвержден экстензометрами: южный Ext_B показал удлинение образца на 4,0 микрона (Рисунок 53b, красная кривая), а северный Ext_A – только на 0,2 микрона (Рисунок 53b, синяя кривая). Стоит отметить, что несмотря на однонаправленный рост трещины, она имеет почти радиальную форму, смещенную от центра образца. Стадия (c) показывает процесс смыкания стенок трещины, события АЭ регистрируются по всей площади поперечного сечения.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 54a) также подтверждают преимущественно юго-западное распространение трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении. Только на последней стадии (c) события АЭ были локализованы по обе стороны скважины на уровне открытой секции скважины. Локализация событий АЭ хорошо совпадает с положением созданной трещины (Рисунок 55a).

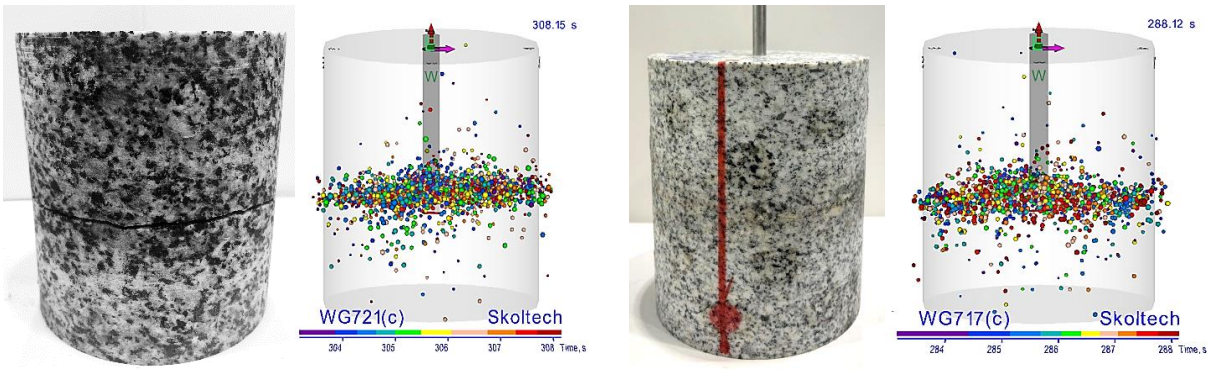
Рисунок 54b демонстрирует три ортогональные проекции положений зарегистрированных сигналов АЭ в образце TG-717. Проекции «вид сверху» отображают почти радиальное распространение трещины, несколько смещенное в восточном, юго-восточном направлениях. На стадии (a) почти радиальное облако залоцированных событий АЭ немного смещено от центра в юго-восточном направлении. На стадии (b) акустические события также представляют собой радиальное облако, смещенное в восточном направлении. Стадия (c) показывает процесс смыкания стенок трещины, события АЭ регистрируются по всей площади поперечного сечения.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 54b) также подтверждают преобладание восточного распространения трещины гидроразрыва в горизонтальном направлении. Только на последней стадии (c) события АЭ были локализованы по обе стороны скважины немного выше уровня открытой секции скважины. Локализация событий АЭ хорошо совпадает с положением созданной трещины (Рисунок 55b).



(a) **(b)**

Рисунок 54. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов WG-721 (a) и TG-717 (b).



(a) **(b)**

Рисунок 55. Фотография образца после эксперимента и локализация событий АЭ для WG-721(a) и TG-717 (b).

3.1.2.3 Дизельная система 2 (ДС-2) (Химеко Н)

Образец WG-722

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии аналогично образцу WG-708. Рисунок 56 демонстрирует графики, описывающие распространение трещины гидроразрыва в образце WG-722.

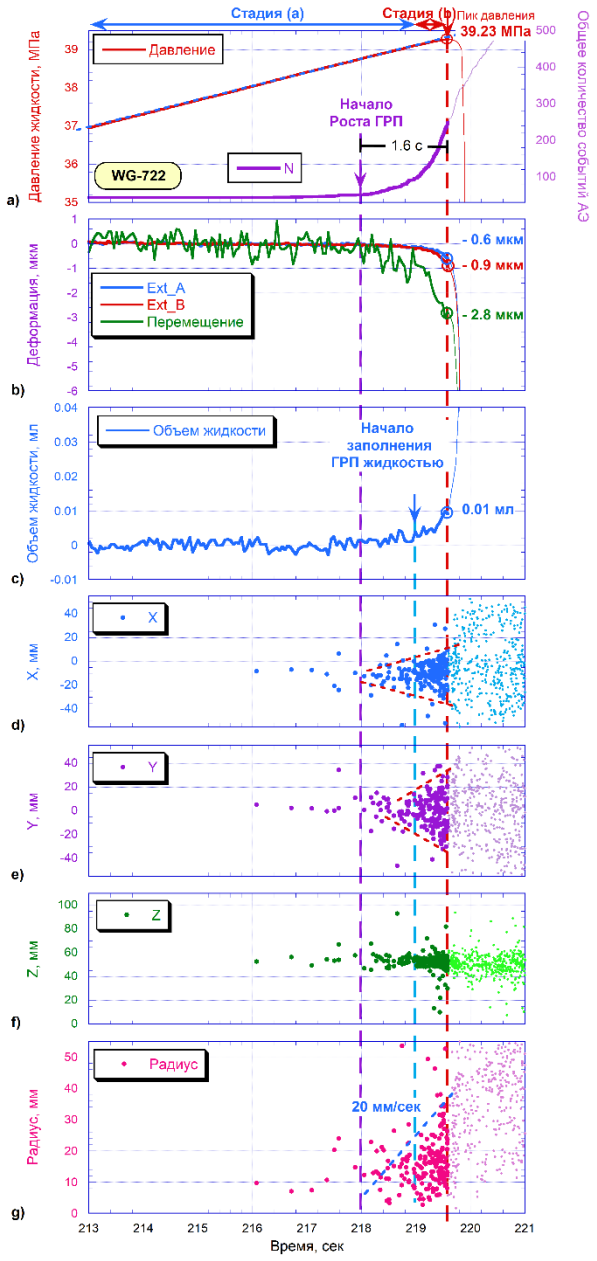


Рисунок 56. Образец WG-722: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и (e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

В образце WG-722 инициация акустической активности произошла на 218,00 секунде эксперимента (Рисунок 56a, фиолетовая кривая). Это за 1,60 секунды до достижения максимального давления жидкости в скважине, равного 39,23 МПа (Рисунок 56a, красная кривая). Отметим, что зарегистрированный интервал короче, чем аналогичный параметр в предыдущем эксперименте (WG-721).

Экстензометр Ext_ A зарегистрировал удлинение образца примерно на 0,6 микрона в момент регистрации максимального давления жидкости в скважине (Рисунок 56b, красная кривая). В этот же момент эксперимента экстензометр Ext_ B зарегистрировал достаточно близкое значение удлинения образца – на 0,9 микрона.

Синей вертикальной пунктирной линией (Рисунок 56c) отмечен момент, когда жидкость гидроразрыва начала поступать в трещину. Это произошло примерно через 1 секунду после инициации трещины, отмеченной вертикальной красной пунктирной линией. Объем жидкости, зарегистрированный в трещине равен 0.01 мл.

Распределение координат зарегистрированных событий АЭ показывает, что трещина распространялась достаточно симметрично. В плоскостях X и Y (Рисунок 56d,e) акустические события распределены почти равномерно в двух направлениях (горизонтальные красные пунктирные линии). В вертикальной плоскости сигналы АЭ расположены на уровне открытой секции скважины (приблизительно на расстоянии 57 мм от основания) (Рисунок 56f). Рисунок 56g демонстрирует скорость роста трещины, которая была определена по данным АЭ и составила 20 мм/сек.

Рисунок 57 демонстрирует три ортогональные проекции положений зарегистрированных сигналов АЭ. Этот эксперимент характеризуется относительно симметричным раскрытием радиальной трещины, слегка смещенной от центра образца на начальной стадии (a) в восточном и юго-восточном направлениях.

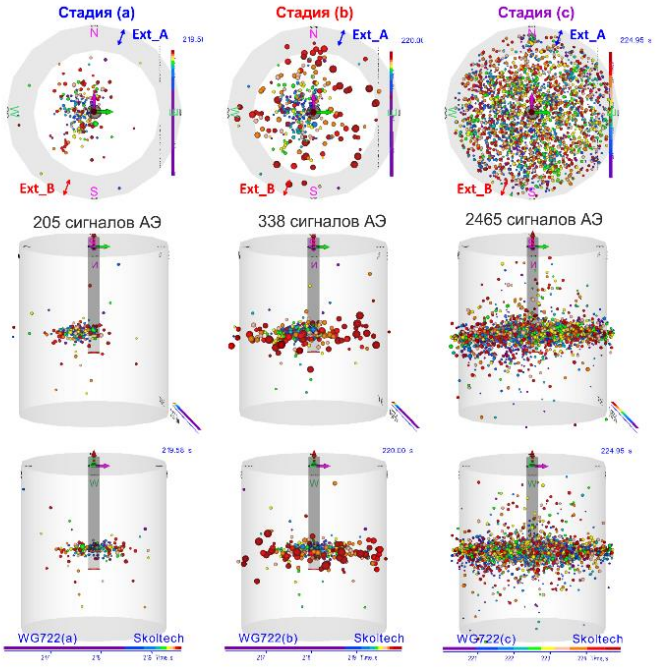


Рисунок 57. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца WG-722.

На стадии (b) наблюдается почти симметричное облако зарегистрированных акустических сигналов. Стадия (c) показывает процесс смыкания стенок трещины гидроразрыва, события АЭ регистрируются по всей площади поперечного сечения. Проекции «вид сбоку» (Рисунок 57) подтверждают однонаправленное распространение трещины на начальной стадии (a). Однако уже на следующей стадии (b) акустические события были зарегистрированы по обе стороны от скважины. Положение событий АЭ достаточно точно повторяет фактическое положение трещины гидроразрыва (Рисунок 58).

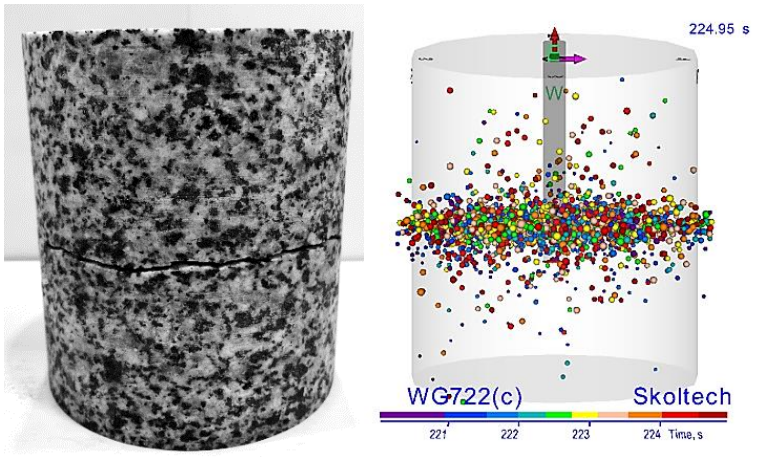


Рисунок 58. Фотографии образца WG-722 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

3.1.2.4 Пенно-азотная система (ПАС)

Образец WG-711

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии аналогично образцу WG-706. Рисунок 59 демонстрирует графики, описывающие распространение трещины гидроразрыва в образце WG-711.

В образце WG-711 на 274,80 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 59a, зеленая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло на 2,20 секунды раньше регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 50,4 МПа (Рисунок 59a, красная кривая).

По техническим причинам отсутствие высокоточных экстензометров в этом эксперименте было скомпенсировано датчиком положения поршня (Рисунок 59b, зеленая кривая). В момент регистрации максимального давления в образце было зафиксировано удлинение образца на 4 микрона. Поступление жидкости в трещину гидроразрыва началось примерно за 1 секунду до достижения максимального давления жидкости и в момент регистрации максимального давления жидкости составило 0,023 мл.

Анализ распределения горизонтальных координат X и Y залоцированных событий АЭ показывает, что трещина распространялась немного асимметрично (Рисунок 59d,e). На начальной стадии эксперимента однонаправленный рост трещины гидроразрыва преобладал в области отрицательных значений осей X и Y. Распределение событий в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (50 мм от основания образца) (Рисунок 59f). Последний из представленных графиков (Рисунок 59g) показывает скорость роста трещины, которая была определена по данным АЭ и составила 10 мм/сек.

Образец WG-714

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии аналогично образцу WG-708. Рисунок 59 демонстрирует графики, описывающие распространение трещины гидроразрыва в образце WG-714.

В образце WG-714 на 267,80 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 59h, зеленая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло за 2,30 секунды до регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 53,9 МПа (Рисунок 59h, красная кривая). Падение давления в скважине после достижения пикового значения происходит не так быстро, как во всех предыдущих экспериментах.

В момент, когда трещина достигла цилиндрической поверхности образца, датчик положения поршня зарегистрировал удлинение образца на 4 микрона (Рисунок 59i, зеленая кривая). Поступление жидкости в трещину началось с задержкой примерно в 1,6 секунды после момента инициации трещины, определяемой по деформации образца и возникновению акустической эмиссии. Объем жидкости в трещине гидроразрыва в момент, когда трещина достигла цилиндрической поверхности образца, составляет 0,017 мл (Рисунок 59j).

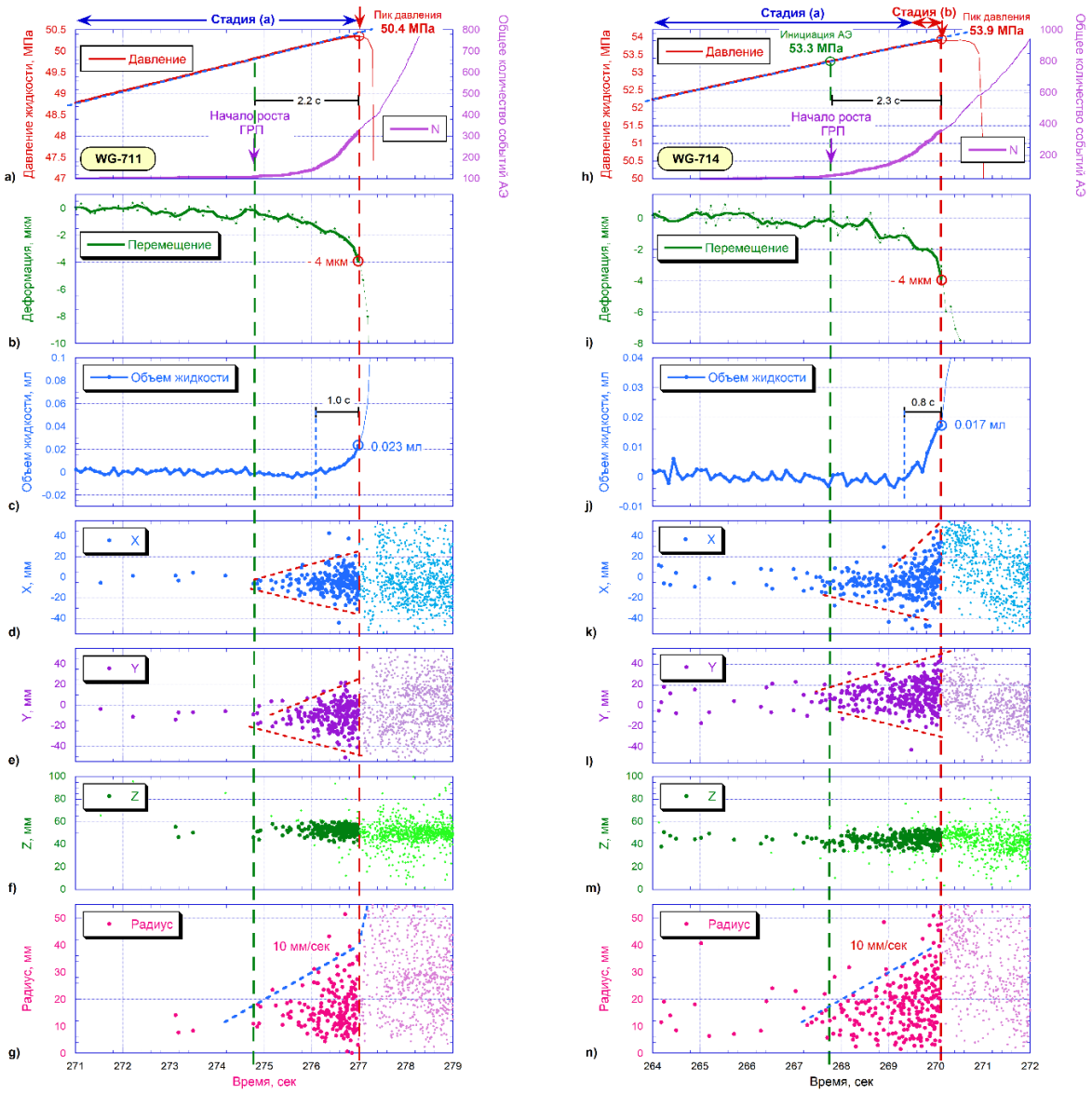


Рисунок 59. Образец WG-711 (слева) и образец WG-714 (справа): (a), (h) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (i) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c), (j) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d), (k) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости X; (e), (l) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Y; (f), (m) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g), (n) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Анализ распределения горизонтальных X и Y координат залоцированных событий демонстрирует асимметричное распространение трещины гидроразрыва. На начальной стадии эксперимента распространение трещины в плоскости X преобладает в отрицательной части координат (Рисунок 59k). В плоскости Y распространение сигналов АЭ незначительно смещено в сторону положительных координат (Рисунок 59l). Скорость распространения сигналов АЭ в плоскости Y не отличается, в то время как в плоскости X

скорости распространения сигналов АЭ отличаются. Распределение событий АЭ в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытой секции скважины (50 мм от основания образца) (Рисунок 59m). Рисунок 59n показывает скорость роста трещины, которая была определена по данным АЭ и составила 10 мм/сек.

Рисунок 60 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий эксперимента. Проекции «вид сверху» на координаты зарегистрированных событий АЭ показывают увеличение сектора распространения трещины с течением времени.

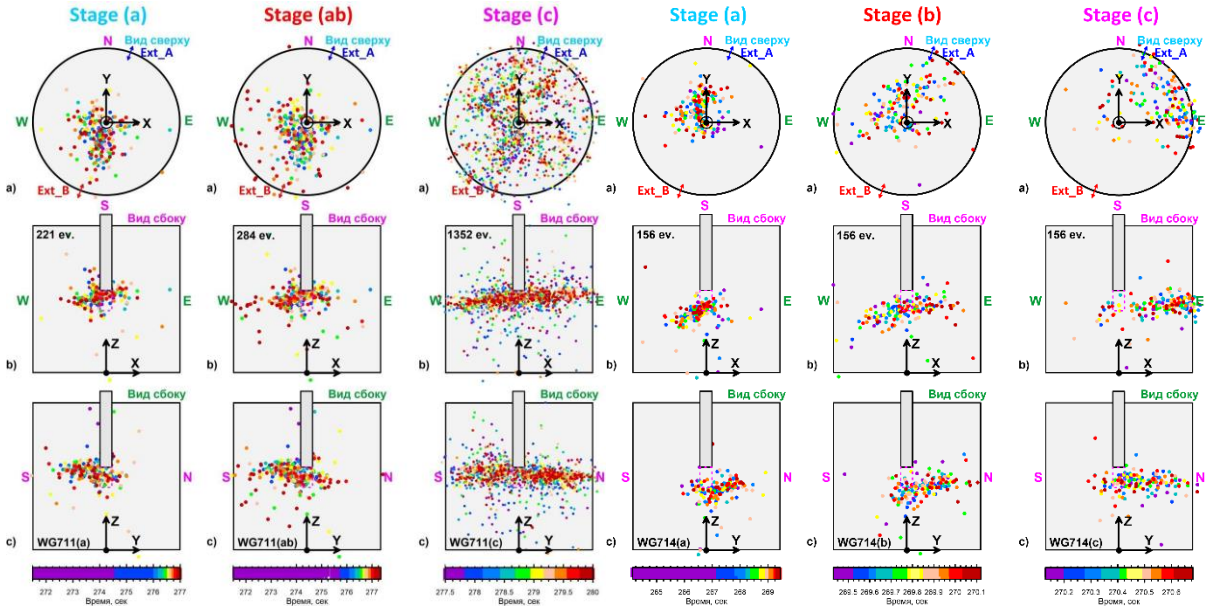


Рисунок 60. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов WG-711 (слева) и WG-714 (справа).

В образце WG-711 на первой стадии (a) наблюдается распределение акустических событий в южном, юго-западном секторе. На второй стадии (b) было зарегистрировано бóльшее количество акустических событий, которые уже занимают бóльшую площадь в секторе с той же направленностью. Третья стадия (c) показывает процесс смыкания стенок трещины гидроразрыва, события АЭ регистрируются по всей площади поперечного сечения. Проекции «вид сбоку» (Рисунок 60) подтверждают, что распространение трещины было однонаправленным в горизонтальной плоскости. Положение залоцированных событий АЭ повторяет положение и форму образовавшейся трещины (Рисунок 61).

Проекции «вид сверху» на координаты событий АЭ показывают увеличение сектора распространения трещины с течением времени. В образце WG-714 на стадии (a) акустические события были зарегистрированы в северном, северо-западном секторе. На стадии (b) было зарегистрировано бóльшее количество акустических событий, которые занимают бóльшую часть площади поперечного сечения образца, но направление роста трещины стало по секущей с северо-востока (I-я координатная четверть) и на юго-запад (III-

я координатная четверть). На стадии (c) трещина занимает 1/4 площади поперечного сечения образца и сосредоточена в I-й координатной четверти.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 60) подтверждают, что рост трещины происходит в основном однонаправленно в горизонтальной плоскости. Положение залоцированных событий АЭ повторяет положение и форму образовавшейся трещины (Рисунок 61).

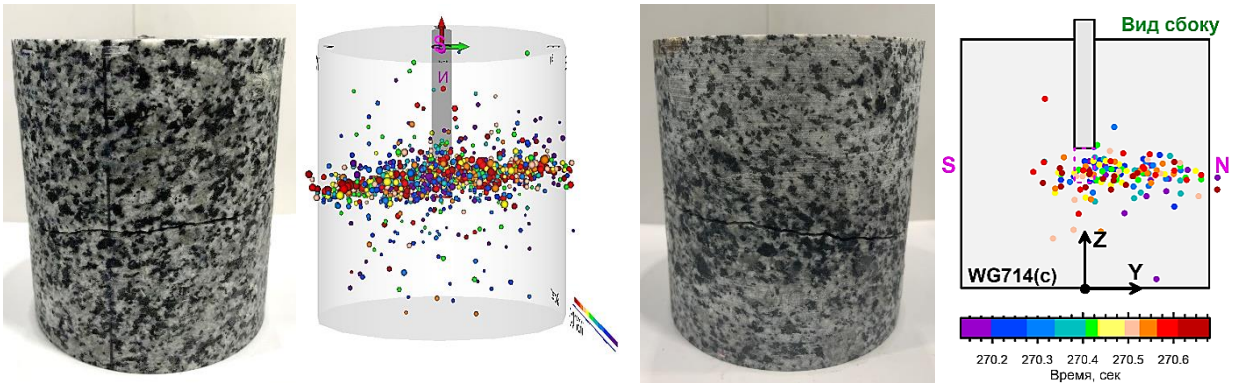


Рисунок 61. Образец WG-711 (слева) и образец WG-714 (справа): Фотография образца WG-714 после эксперимента и локализация событий АЭ.

3.1.2.5 Жидкий CO_2

Образец WG-707

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии (a), (b) и (c) аналогично образцу WG-705, таким образом, что окончание стадии (a) соответствует моменту, когда трещина гидроразрыва достигает цилиндрической поверхности образца. Рисунок 62 демонстрирует графики, подробно описывающие параметры трещины гидроразрыва, зарегистрированные в образце WG-707.

В образце WG-707 на 291,60 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 62a, зеленая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло на 2,25 секунды раньше регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 46,50 МПа (Рисунок 62a, красная кривая). После достижения пикового значения падение давления в скважине наблюдается не сразу.

Анализ данных, зарегистрированных датчиком положения поршня, указывает на начало удлинения образца с возникновением акустической активности (Рисунок 62a, зеленая вертикальная пунктирная линия). В тот момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца составило 1,2 микрона (Рисунок 62b, зеленая кривая), и в момент максимального давления жидкости оно было равным 5,3 микрон. Следует отметить, что трещина гидроразрыва достигла цилиндрической поверхности

образца WG-707 раньше регистрации максимального давления в скважине, что объясняется малой величиной раскрытия трещины.

В момент, когда трещина достигла поверхности образца, объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, составлял 0,012 мл, а в момент регистрации максимального давления это значение составляло уже 0,860 мл (Рисунок 62c).

Рисунок 62 демонстрирует асимметричное распределение горизонтальных X и Y координат залоцированных событий АЭ. Большинство сигналов АЭ было зарегистрировано в области отрицательных значений плоскости X (Рисунок 62d). В то время как в плоскости Y большинство сигналов АЭ было зарегистрировано в области положительных значений координат (Рисунок 62e). Распределение акустических событий в вертикальной плоскости Z демонстрирует их положение на уровне открытой секции скважины (60 мм от основания образца) (Рисунок 62f). Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости роста трещины, была постоянной до момента, когда трещина достигла цилиндрической поверхности образца, и составляла около 44 мм/сек (Рисунок 62g).

Образец WG-709

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии (a), (b) и (c) аналогично образцу WG-705, таким образом, что окончание стадии (a) соответствует моменту, когда трещина гидроразрыва достигает цилиндрической поверхности образца. Рисунок 62 демонстрирует графики и подробное описание представленных на них параметров, зафиксированных при распространении трещины гидроразрыва в образце WG-709.

В образце WG-709 на 255,50 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 62h, зеленая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло на 2,98 секунды раньше регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 47,2 МПа (Рисунок 62h, красная кривая).

Анализ положения поршня во время эксперимента указывает на начало удлинения образца с возникновением акустической активности, вызванной раскрытием трещины гидроразрыва. В тот момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца составило 1,1 микрона (Рисунок 62i, зеленая кривая). Следует отметить, что, как и во время закачки ЛГ (образец WG-705), трещина достигла цилиндрической поверхности образца WG-709 (Рисунок 62, синяя вертикальная пунктирная линия) до регистрации максимального давления в скважине, что объясняется малой величиной раскрытия

трещины. Более того, в образце WG-709 трещина достигла поверхности за две секунды до достижения максимального давления жидкости в скважине, в то время как в образце WG-705 трещина достигла поверхности за 0,5 секунды до максимального давления (Рисунок 41a). Это может быть связано с несколько бóльшим раскрытием трещины гидроразрыва (2,4 микрона) в случае закачки ЛГ (Рисунок 41b) по сравнению с раскрытием, равным 1,1 микрона, в случае закачки L-CO_2 (Рисунок 62i).

Объем жидкости в трещине гидроразрыва, который также был определен в момент достижения трещиной цилиндрической поверхности образца, составляет 0,008 мл (Рисунок 62j). Это значение немного меньше объема жидкости в трещине гидроразрыва во время закачки ЛГ (0,02 мл), что также может быть связано с меньшим раскрытием трещины в случае закачки L-CO_2.

Анализ распределения горизонтальных X и Y координат зарегистрированных событий АЭ (Рисунок 62k,l) демонстрирует асимметричное распространение трещины гидроразрыва, причем в плоскости X большинство акустических сигналов были зарегистрированы в области отрицательных значений координат (Рисунок 62k). Распределение акустических событий в вертикальной Z плоскости демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (65-70 мм от основания образца) (Рисунок 62m). Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости роста трещины, была постоянной до момента, когда трещина достигла поверхности образца, и составляла 50 мм/сек (Рисунок 62n).

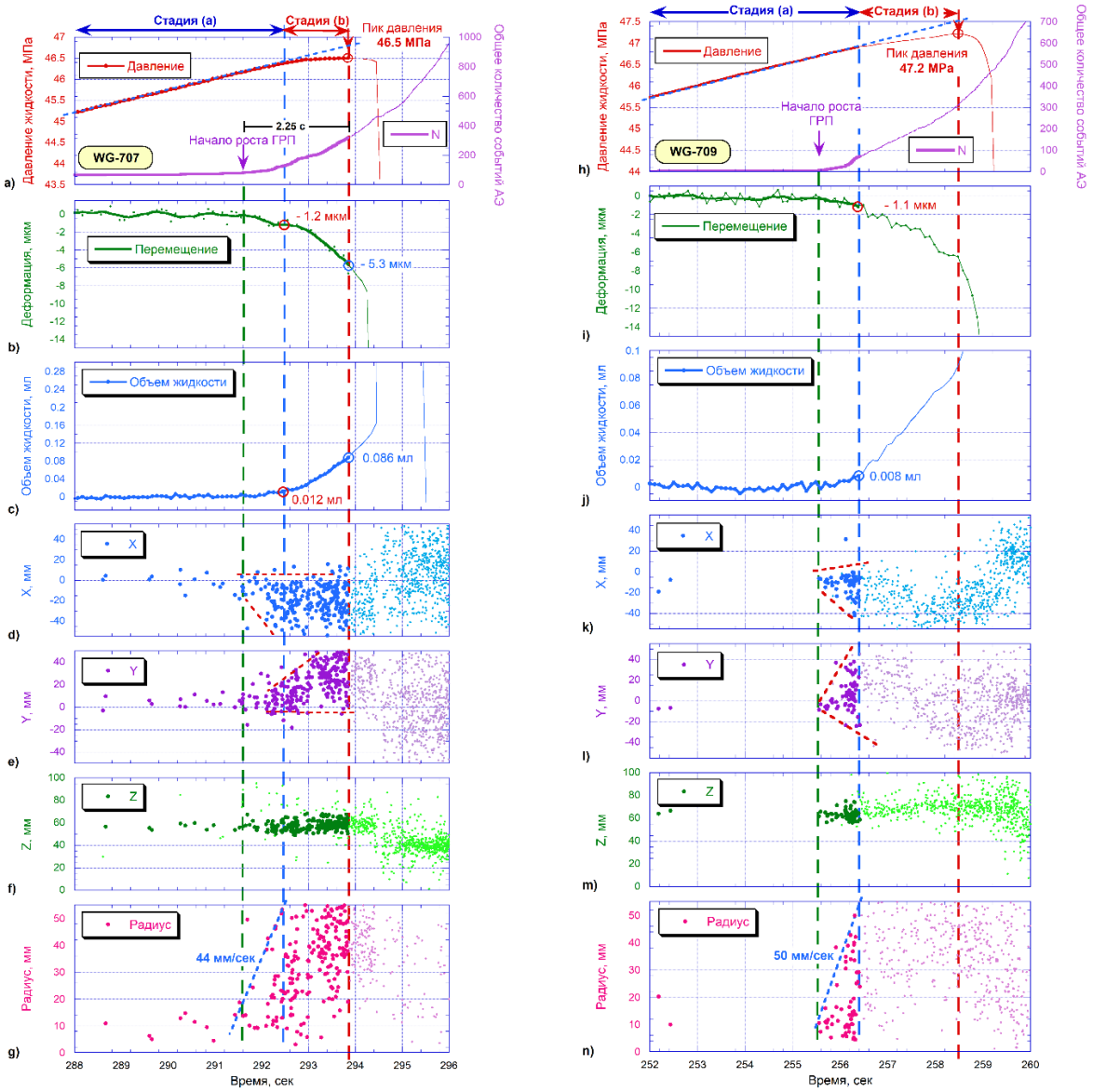


Рисунок 62. Образец WG-707 и образец WG-709: (a), (h) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (i) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c), (j) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d), (k) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости X; (e), (l) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Y; (f), (m) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g), (n) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 63 демонстрирует три ортогональные проекции распределения сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий эксперимента. В образце WG-707 проекции «вид сверху» на координаты акустических событий показывают значительное расширение сектора распространения трещины с течением времени. На стадии (a) было зарегистрировано незначительное количество акустических событий, и они распределены, в большей степени, в северо-западном секторе. На стадии (b) было зарегистрировано

бóльшее число акустических событий, которые занимают 1/4 площади поперечного сечения образца. Наибольшее количество сфер, отображающих акустические события, было зарегистрировано в северо-западном секторе (II-я четверть координат (90-180°). На стадии (c) акустические события были зарегистрированы на всей площади поперечного сечения образца. Проекции «вид сбоку» (Рисунок 63) также подтверждают однонаправленное (северо-западное) распространение трещины гидроразрыва в горизонтальной плоскости, которое постепенно расширяется. Локализация акустических событий хорошо сопоставима с трещиной, образовавшейся в ходе эксперимента (Рисунок 64).

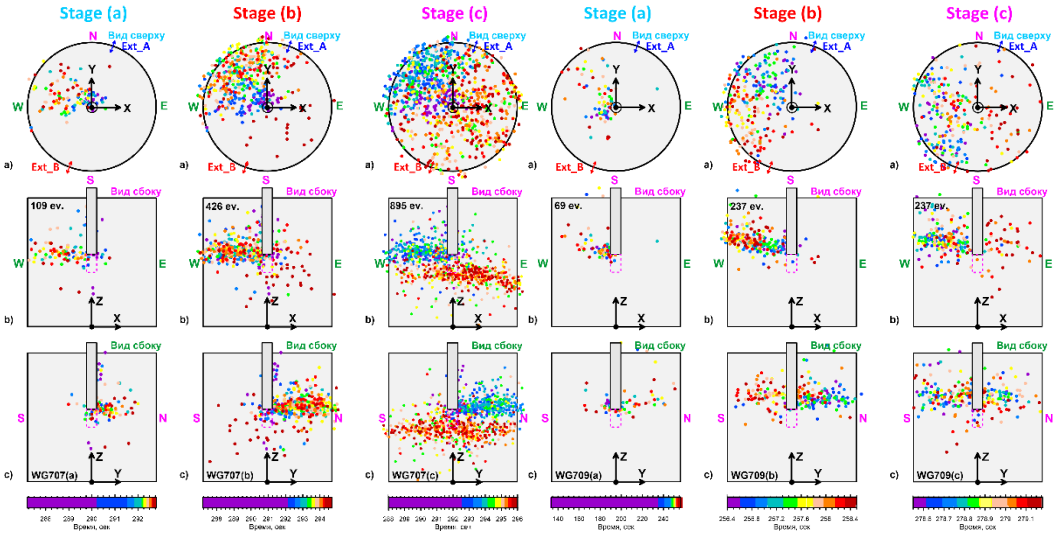


Рисунок 63. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов WG-707 (слева) и WG-709 (справа).

Проекции «вид сверху» на координаты зарегистрированных акустических событий показывают значительное расширение сектора распространения трещины с течением времени. В образце WG-709 на стадии (a) было зарегистрировано небольшое количество акустических событий (69), в большей степени в северо-западном и, в меньшей степени, в юго-западном направлении от скважины (центра образца). На стадии (b) было зарегистрировано уже 237 акустических события, которые занимают 1/3 площади поперечного сечения образца (в секторе с севера на юго-запад). На стадии (c) акустические события были зарегистрированы почти на всей площади поперечного сечения образца, однако, количественно они преобладают в секторе, описанном на стадии (b).

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 63) также подтверждают однонаправленный (северо-западный) рост трещины в горизонтальной плоскости, с постепенным расширением. Локализация акустических событий также хорошо сопоставима с созданной трещиной гидроразрыва (Рисунок 64).

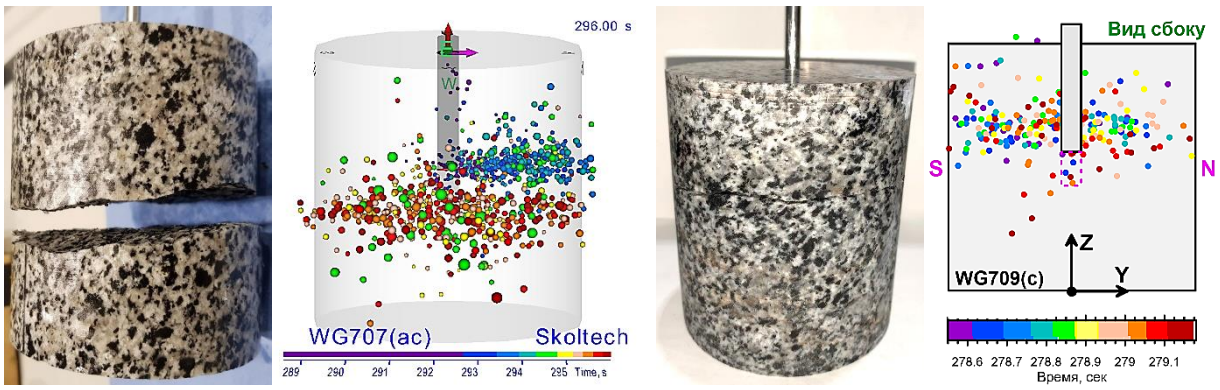


Рисунок 64. Образец WG-707 (слева) и образец WG-709 (справа): фотографии образца после эксперимента и локализация событий АЭ.

Образец WG-715

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был также разделен на стадии (a), (b) и (c). Окончание стадии (a) соответствует моменту возникновения акустической активности, которая свидетельствует о зарождении трещины. Стадия (b) заканчивается в момент достижения максимального давления жидкости в скважине, приблизительно в этот же момент трещина гидроразрыва достигает боковой поверхности образца (красная пунктирная линия). Стадия (c) демонстрирует процесс падения давления в скважине и последующее смыкание стенок трещины. Рисунок 65 иллюстрирует графики и подробное описание представленных на них параметров, зафиксированных при распространении трещины гидроразрыва в образце WG-715.

В образце WG-715 на 309,10 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 65a, зеленая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло на 0,2 секунды раньше регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 50,4 МПа (Рисунок 65a, красная кривая). После достижения пикового значения в скважине произошло падение давления.

Момент, когда трещина достигла поверхности, совпал со временем регистрации максимального давления жидкости в скважине, и удлинение образца в этот момент составило 1,0 микрон (Рисунок 65b, зеленая кривая). Начало поступления жидкости в трещину было зафиксировано за 0,1 секунды до момента максимального давления. А объем жидкости в трещине в момент, когда трещина достигает поверхности образца, составляет 0,01 мл (Рисунок 65c).

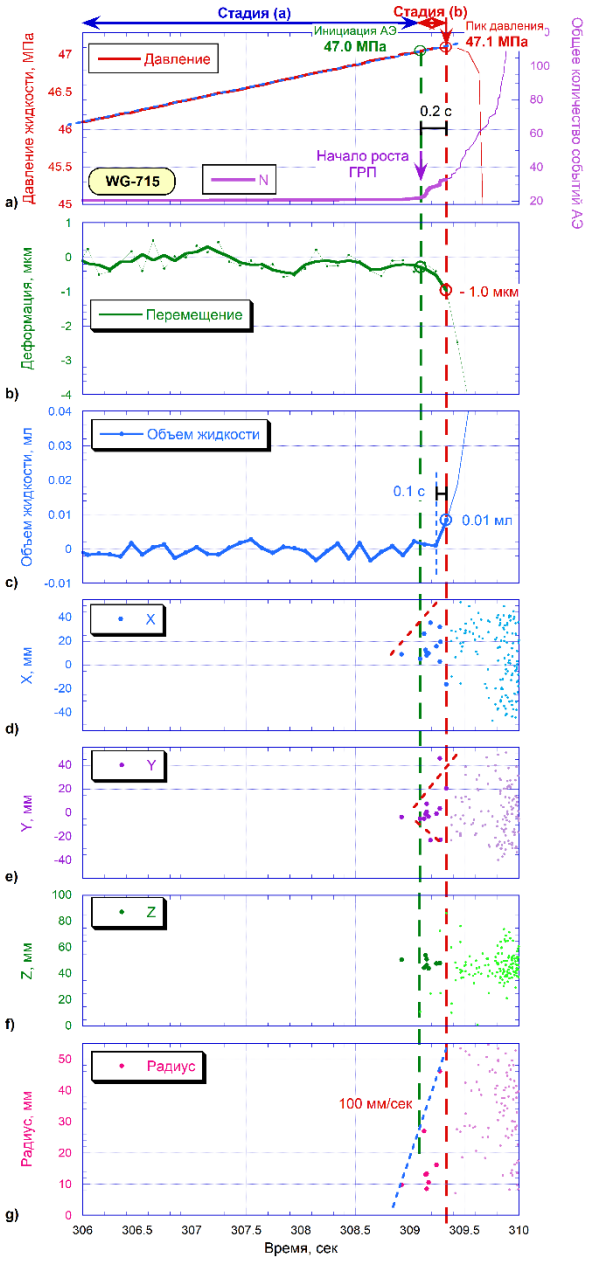


Рисунок 65. Образец WG-715: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и (e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Анализ распределения координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 65d,e) демонстрирует асимметричное распространение трещины гидроразрыва в плоскостях X и Y. Более того, большинство акустических сигналов было зарегистрировано в области положительных значений координат X и Y. Распределение АЭ событий в вертикальной плоскости Z демонстрирует их локализацию на уровне открытого участка скважины (50 мм от основания образца) (Рисунок 65f). Скорость распространения облака сигналов АЭ,

которую можно считать равной скорости роста трещины, была постоянной до момента, когда трещина достигла поверхности образца, и составляла 100 мм/сек (Рисунок 65g).

Рисунок 66 демонстрирует три ортогональные проекции распределения зарегистрированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий эксперимента. На стадии (a) было зарегистрировано небольшое количество акустических событий (15), в большей степени в юго-восточном секторе (IV-я четверть координат (270-360°)). На стадии (b) было инициировано 55 акустических событий, которые покрыли 2/3 площади поперечного сечения образца. Преобладающее количество событий АЭ также было зарегистрировано в восточном, юго-восточном секторах. На стадии (c) акустические события почти полностью занимают нижнюю половину поперечного сечения образца.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 66) также подтверждают однонаправленное развитие трещины гидроразрыва в горизонтальной плоскости.

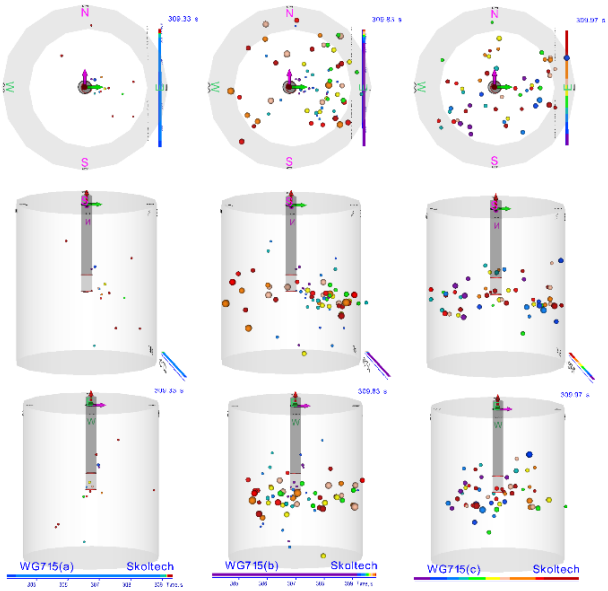


Рисунок 66. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца WG-715.

Локализация акустических событий хорошо повторяет положение и форму образовавшейся в ходе эксперимента трещины (Рисунок 67).

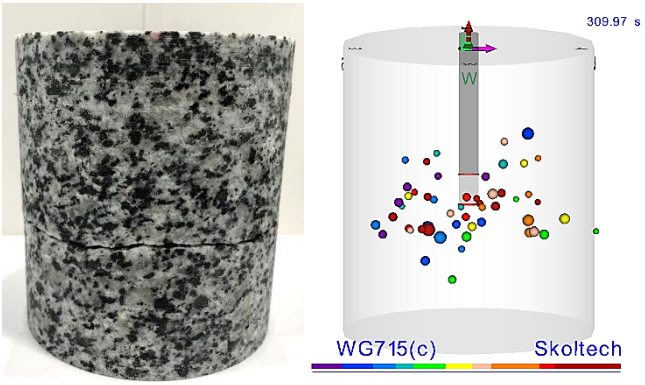


Рисунок 67. Фотографии образца WG-715 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

3.1.2.6 Силиконовое масло (жидкость полиметилсилоксановая (ПМС)) ПМС-1000

Образец WG-723

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии аналогично образцу WG-708. Рисунок 68 демонстрирует графики, описывающие распространение трещины гидроразрыва в образцах WG-723 и TG-701.

В образце WG-723 возникновение акустической активности (Рисунок 68a (левый), фиолетовая кривая) наблюдалось на 306,10 секунде эксперимента. Этот момент (фиолетовая вертикальная пунктирная линия) произошел за 13,00 секунд до достижения максимального давления, равного 52,72 МПа (Рисунок 68a (левый), красная кривая).

В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца WG-723 было зафиксировано равным 11,4 микрона (Рисунок 68b, зеленый). В этот же момент времени, в образце WG-723 экстензометр Ext_A зарегистрировал удлинение образца приблизительно на 14,5 микрона (Рисунок 68b, синяя кривая), а экстензометр Ext_B – на 2,0 микрона (Рисунок 68b, красная кривая). Основываясь на измерениях деформации образца, можно предположить, что в образце WG-723 трещина распространялась асимметрично, главным образом в направлении экстензометра Ext_A. Объем жидкости в трещине в момент, когда трещина достигает поверхности образца WG-723, составляет 0,052 мл (Рисунок 68c).

Распределение координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 68d, e) показывает, что трещина гидроразрыва в образце WG-723 распространялась несколько асимметрично в плоскостях X и Y со смещением в область положительных значений осей. Положение зарегистрированных событий АЭ в вертикальной плоскости Z было приблизительно на уровне участка открытой секции скважины (40-60 мм от основания) (Рисунок 68f). Важно отметить, что в образце WG-723 трещина достигла поверхности образца до регистрации максимального давления. Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости роста трещины, на начальной стадии была равна 2,2 мм/сек, по мере приближения к поверхности образца скорость возросла до 5,5 мм/сек (Рисунок 68g).

Образец TG-701

Процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии аналогично образцу WG-708. Рисунок 68 демонстрирует графики, описывающие распространение трещины гидроразрыва в образце TG-701.

В образце TG-701 возникновение акустической активности (Рисунок 68h, фиолетовая кривая) наблюдалось на 192,50 секунде эксперимента. Этот момент

(фиолетовая вертикальная пунктирная линия) произошел за 8,70 секунд до достижения максимального давления, равного 58,90 МПа (Рисунок 68h, красная кривая). Падение давления жидкости в скважине наблюдается после достижения пикового значения.

В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца TG-701 было зафиксировано равным 16,0 микронам (Рисунок 68i, зеленый). Экстензометр Ext_A зарегистрировал удлинение образца приблизительно на 25,0 микронов (Рисунок 68i, синяя кривая), а экстензометр Ext_B – на 2,4 микрона (Рисунок 68i, красная кривая). Данные измерения также свидетельствуют о значительной асимметрии в раскрытии трещины. Объем жидкости в трещине в момент, когда трещина достигает поверхности образца TG-701, составляет 0,098 мл (Рисунок 68j).

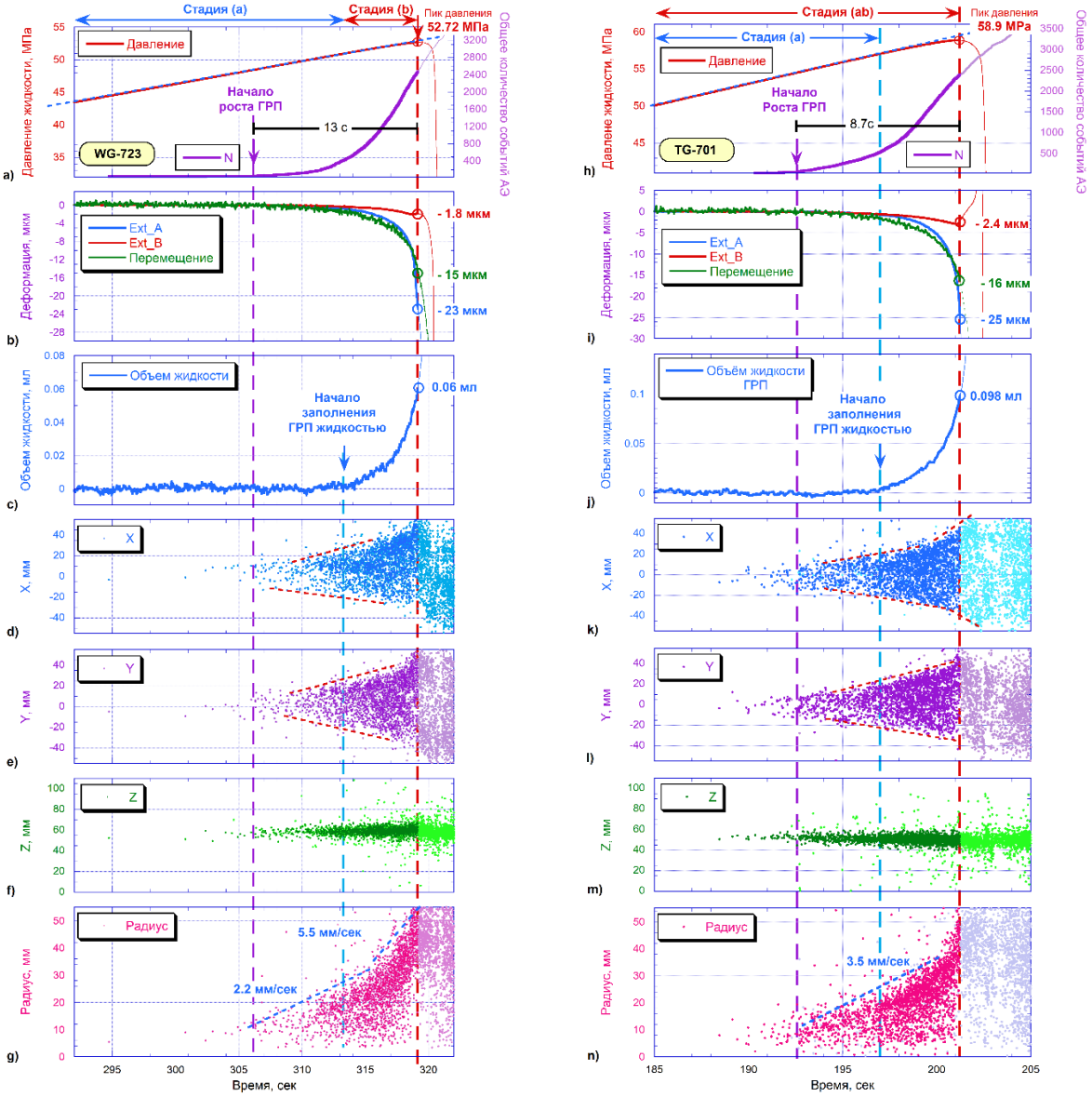


Рисунок 68. Образцы WG-723(слева) и TG-701(справа): (a), (h) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (i) осевая деформация, измеренная левым (красный) и правым (синий) датчиками и кривой, описывающей перемещения поршня (зеленый); (c), (j) объём жидкости,

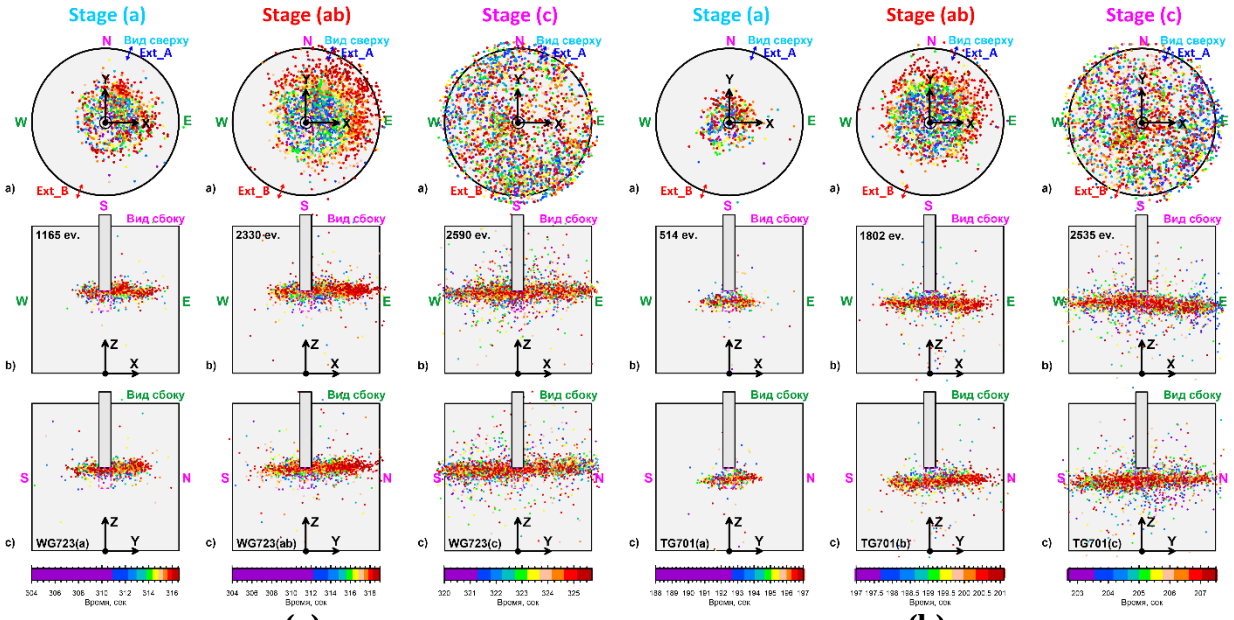
закаченной в трещину гидроразрыва; (d), (k) и (e), (l) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y, соответственно; (f), (m) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ; (g), (n) распределение залоцированных сигналов АЭ из центра образца к поверхности. Все параметры построены от времени эксперимента.

Распределение координат зарегистрированных событий АЭ (Рисунок 68k, l) показывает, что трещина гидроразрыва в обоих образцах распространялась асимметрично в плоскостях X и Y со смещением в область положительных значений осей. Положение зарегистрированных событий АЭ в вертикальной плоскости Z было приблизительно на уровне участка открытой секции скважины (50 мм от основания) (Рисунок 68m). Важно отметить, что в образце TG-701 трещина достигла поверхности образца в момент максимального давления. Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости роста трещины, была равна 3,5 мм/сек (Рисунок 68n).

Рисунок 69a демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий эксперимента гидроразрыва. Проекции «вид сверху» (Рисунок 69a) описывают геометрию и направление распространения трещины, которое было выявлено на основе положения залоцированных событий АЭ. В образце WG-723 на стадии (a) наблюдается радиальное облако событий АЭ, повторяющее форму трещины гидроразрыва, несколько смещенное от центра образца в северо-восточном направлении. На стадии (b) было зарегистрировано бóльшее число сигналов АЭ с сохранением радиальной формы трещины, однако она значительнее смещена от центра в северо-восточном направлении (в сторону экстензометра _A). Асимметричное раскрытие трещины также подтверждается независимыми измерениями экстензометров. Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует полное рассеяние событий АЭ по всему поперечному сечению.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 69a) также подтверждают радиальное развитие трещины гидроразрыва с некоторым смещением в северо-восточном направлении в горизонтальной плоскости. Локализация акустических событий хорошо повторяет положение и форму образовавшейся в ходе эксперимента трещины (Рисунок 70a).

В образце TG-701 (Рисунок 69b) на стадии (a) наблюдается радиальное облако событий АЭ, повторяющее форму трещины гидроразрыва, в центре образца. На стадии (b) было зарегистрировано бóльшее число сигналов АЭ с сохранением радиальной формы трещины, однако она немного смещена от центра в северо-восточном направлении. Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует полное рассеяние событий АЭ по всему поперечному сечению.



(a) **(b)**

Рисунок 69. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов WG-723 (a) и TG-701 (b).

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 69b) также подтверждают радиальное развитие трещины гидроразрыва с небольшим смещением в северо-восточном направлении в горизонтальной плоскости. Локализация акустических событий хорошо повторяет положение и форму образовавшейся в ходе эксперимента трещины (Рисунок 70b).

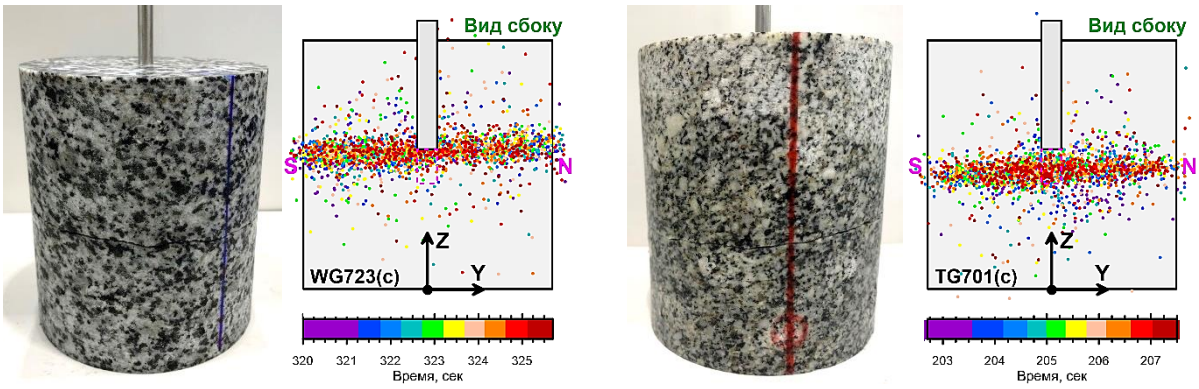


Рисунок 70. Фотография образца после эксперимента и локализация событий АЭ для образцов WG-723(a) и TG-701 (b).

3.1.2.7 Силиконовое масло (жидкость полиметилсилоксановая (ПМС)) ПМС-10 000

Образец WG-719

Весь процесс зарождения и распространения трещины гидроразрыва был разделен на стадии (a), (b) и (c) аналогично образцу WG-715, таким образом, что окончание стадии (a) соответствует моменту инициации акустической активности, которая вызвана возникновением трещины гидроразрыва. Рисунок 71 демонстрирует графики и подробное

описание представленных на них параметров, зафиксированных при распространении трещины гидроразрыва в образце WG-719.

В образце WG-719 возникновение акустической активности (Рисунок 71a, фиолетовая кривая) наблюдалось на 1758,00 секунде эксперимента. Этот момент (фиолетовая вертикальная пунктирная линия) произошел за 94,00 секунды до достижения максимального давления, равного 57,9 МПа (Рисунок 71a, красная кривая). Падение давления в скважине наблюдается после достижения пикового значения.

В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано равным 17,9 микрона (Рисунок 71b, зеленый). В этот же момент времени, экстензометр Ext_A зарегистрировал удлинение образца приблизительно на 10,2 микрона (Рисунок 71b, синяя кривая), а экстензометр Ext_B – на 10,9 микрона (Рисунок 71b, красная кривая). Основываясь на измерениях деформации, можно предположить, что трещина распространялась симметрично. Рисунок 71c демонстрирует объем жидкости, поступившей в трещину. Объем жидкости в трещине в момент, когда трещина достигает поверхности образца, составляет 0,090 мл (Рисунок 71c).

Распределение координат залоцированных событий АЭ (Рисунок 71d, e) показывает, что трещина гидроразрыва распространялась симметрично в плоскостях X и Y. Положение зарегистрированных событий АЭ в вертикальной плоскости Z было приблизительно на уровне участка открытой секции скважины (50-70 мм от основания) (Рисунок 71f). Важно отметить, что трещина ускорилась по мере приближения к цилиндрической поверхности образца. Этот момент совпал с моментом регистрации максимального давления. Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости роста трещины, на начальной стадии была равна 0,4 мм/сек, по мере приближения к поверхности образца скорость возросла до 1,4 мм/сек (Рисунок 71g).

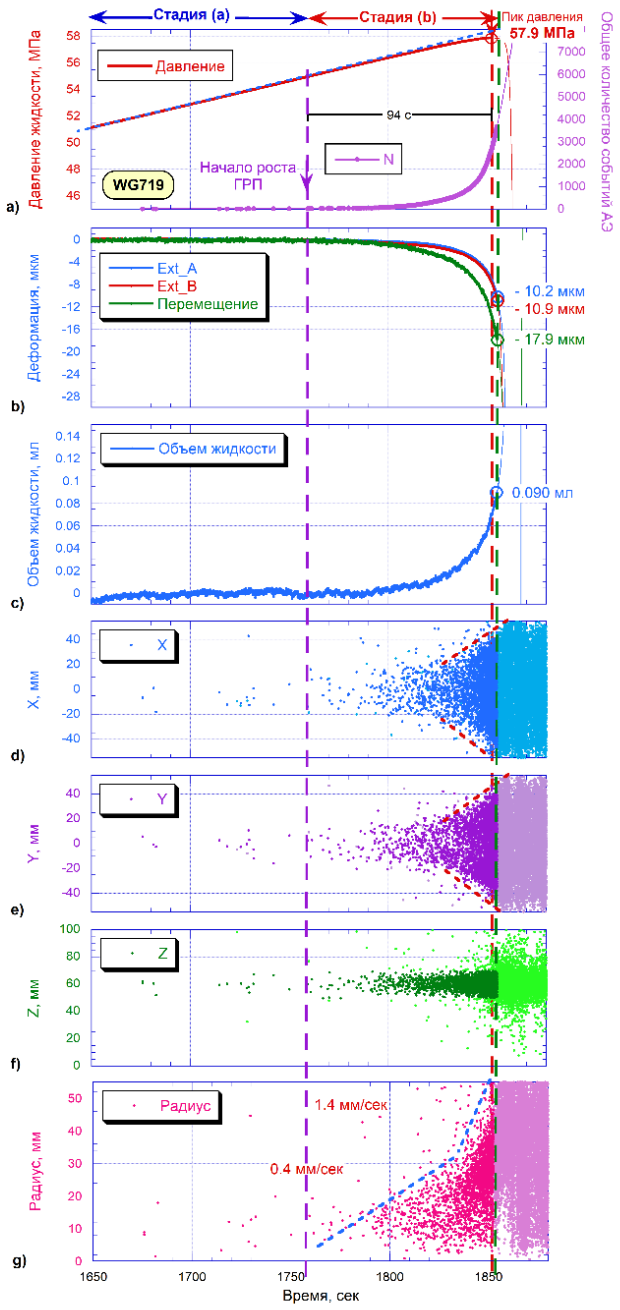


Рисунок 71. Образец WG-719: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и (e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 72 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для четырех стадий гидроразрыва. Положение сигналов АЭ представлено в виде сфер, цвет которых соответствует времени, показанной на шкале в нижней части каждой проекции. Проекции

«вид сверху» (Рисунок 72) описывают геометрию и направление распространения трещины, которое было выявлено на основе положения залоцированных событий АЭ. На стадии (a), перед падением давления в стволе скважины, наблюдаются радиальное распространение акустических событий. На стадии (b) было зафиксировано увеличение числа акустических событий с сохранением радиальной формы распространения. Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует четкий фронт распространения трещины.

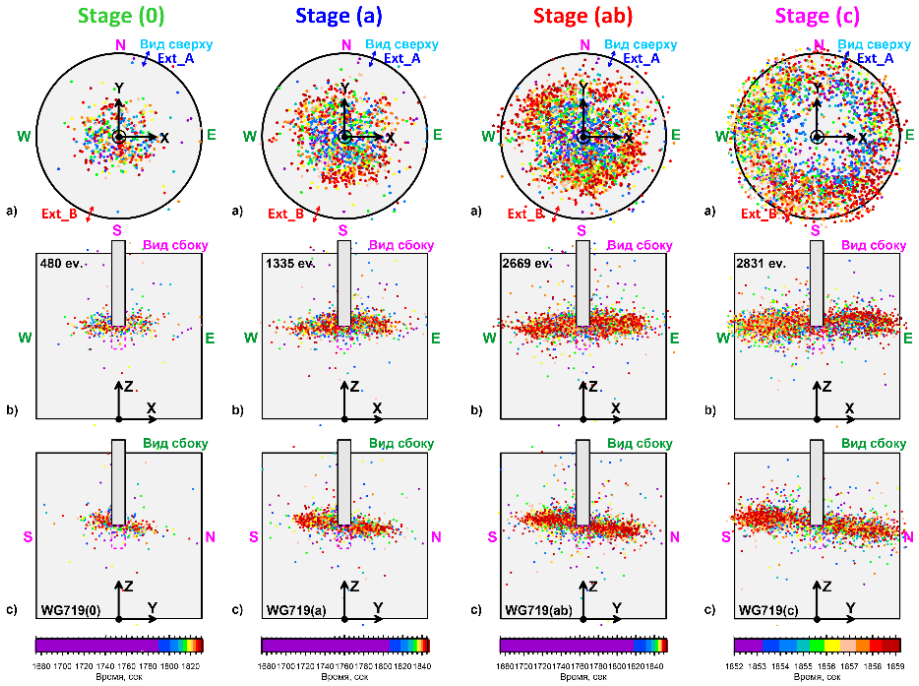


Рисунок 72. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца WG-719.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 72) также подтверждают симметричное (радиальное) развитие трещины гидроразрыва в горизонтальной плоскости. Локализация акустических событий хорошо повторяет положение и форму образовавшейся в ходе эксперимента трещины (Рисунок 73).

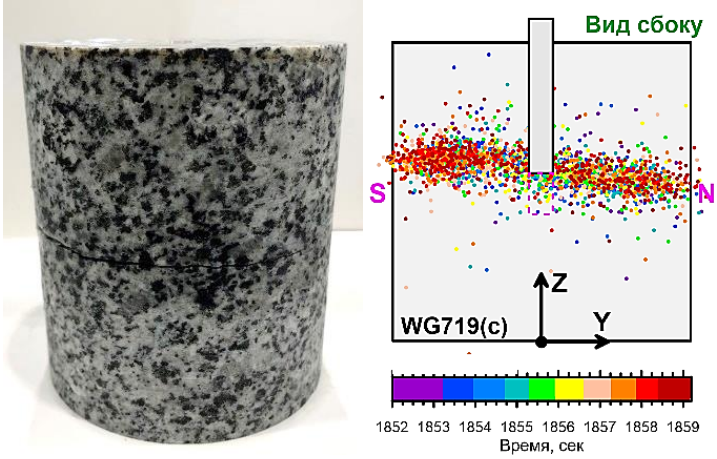


Рисунок 73. Фотографии образца WG-719 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

3.1.2.8 Силиконовое масло (жидкость полиметилсилоксановая (ПМС)) ПМС-100 000

Образец WG-713

В образце WG-713 возникновение акустической активности (Рисунок 74a, фиолетовая кривая) наблюдалось на 2150,00 секунде эксперимента. Этот момент (зеленая вертикальная пунктирная линия) произошел за 220,00 секунд до достижения максимального давления, равного 63,2 МПа (Рисунок 74a, красная кривая). Падение давления в скважине наблюдается после достижения пикового значения.

В момент, когда трещина достигла поверхности образца, удлинение образца было зафиксировано датчиком перемещения поршня и парой симметрично установленных экстензометров равным 64 микрона (Рисунок 74b). Основываясь на измерениях деформации, можно предположить, что трещина распространялась симметрично.

Положение зарегистрированных событий АЭ в вертикальной плоскости Z было приблизительно на уровне участка открытой секции скважины (40-60 мм от основания) (Рисунок 74f). Важно отметить, что трещина достигла поверхности образца до регистрации максимального давления. Скорость распространения облака сигналов АЭ, которую можно считать равной скорости роста трещины, на начальной стадии была равна 0,1 мм/сек и увеличилась до 1 мм/сек к моменту приближения трещины к цилиндрической поверхности образца (Рисунок 74g).

Рисунок 74c демонстрирует объем жидкости, поступившей в трещину. Объем жидкости в трещине в момент, когда трещина достигает поверхности образца, составляет 0,385 мл (Рисунок 74c). Распределение координат зарегистрированных событий АЭ (Рисунок 74d,e) показывает, что трещина гидроразрыва распространялась симметрично в плоскостях X и Y.

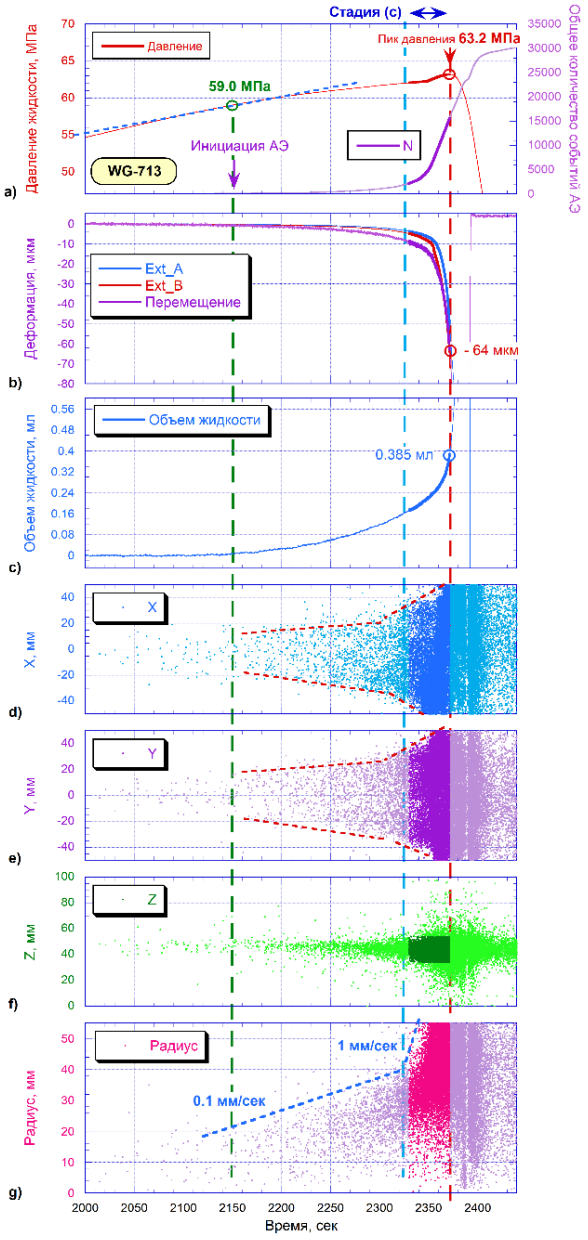


Рисунок 74. Образец WG-713: (a) давление жидкости (красный) и общее количество локализованных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевые деформации, измеренные левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами, и кривая, показывающая положение нагрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва; (d) и (e) горизонтальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскостях X и Y соответственно; (f) вертикальные координаты локализованных сигналов АЭ в плоскости Z; (g) распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности. Все параметры построены в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 75 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в трехмерном пространстве для трех стадий гидроразрыва. Положение сигналов АЭ представлено в виде сфер, цвет которых соответствует времени, показанной на шкале в нижней части каждой проекции. Проекции «вид сверху» (Рисунок 75) описывают геометрию и направление распространения трещины, которое было выявлено на основе положения залоцированных событий АЭ. На стадии (a), перед падением

давления в стволе скважины, наблюдаются радиальное распространение акустических событий. На стадии (b) было зафиксировано увеличение числа акустических событий с сохранением радиальной формы распространения. Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует четкий фронт распространения трещины.

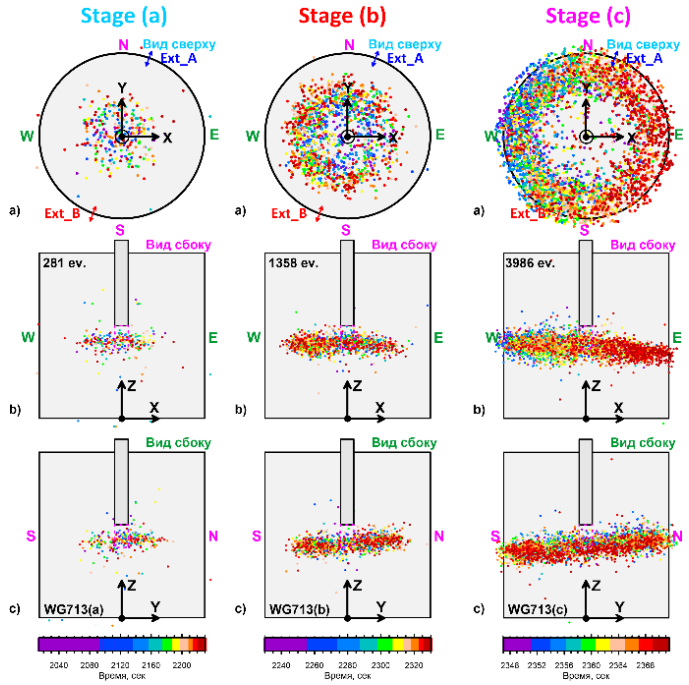


Рисунок 75. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца WG-713.

Проекции «вид сбоку» (Рисунок 75) также подтверждают однонаправленное развитие трещины гидроразрыва в горизонтальной плоскости. Локализация акустических событий хорошо повторяет положение и форму образовавшейся в ходе эксперимента трещины (Рисунок 76).

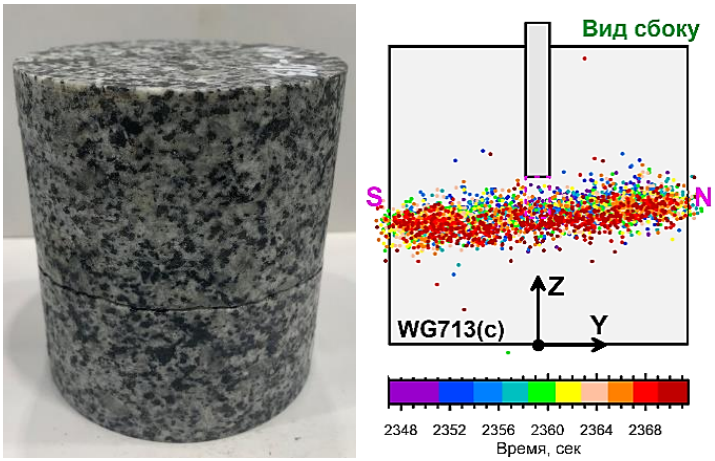


Рисунок 76. Фотографии образца WG-713 после эксперимента (слева) и локализация событий АЭ (справа).

Таблица 21 демонстрирует результаты лабораторного гидроразрыва пласта в псевдо-трехосных условиях. Инициация трещины гидроразрыва была вызвана закачкой

жидкостей с широким диапазоном вязкости: L-CO_2, дистиллированная вода, ЛГ, ДС-1, ДС-2, ДС-2, ДС-3, НЕФТЕНОЛ ВУПАВ, Полигель, ПМС-1000, ПМС-10000, ПМС-100000.

Обозначения, представленные в таблице: ΔL – удлинение цилиндрического образца, зарегистрированное датчиком перемещения поршня в момент достижения трещиной поверхности образца; ΔL_A – удлинение цилиндрического образца, зарегистрированное Ext_A в момент достижения трещиной поверхности образца; ΔL_B – удлинение цилиндрического образца, зарегистрированное Ext_B в момент достижения трещиной поверхности образца; $V_{тр}$ – объем жидкости гидроразрыва в трещине в момент достижения трещиной поверхности образца; T – интервал времени от инициации трещины гидроразрыва до регистрации максимального давления жидкости (давления гидроразрыва).

Таблица 21. Результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва в псевдо-трехосных условиях.

№ п.п.	№ образца	Жидкость гидроразрыва	Давление гидроразрыва, МПа	P_{net}, МПа	ΔL_A, мкм	ΔL_B, мкм	ΔL, мкм	$V_{тр}$, мл	Скорость роста трещины, мм/с	T, с	Дин. вязкость жидкости гидроразрыва при 100^{-c}, сП	σ_1, МПа	σ_3, МПа
1	WG-707	L-CO_2	46.5	23.5	–	–	1.2	0.01	44	2.3	~0.13	37	23
2	WG-709		47.2	24.2	–	–	1.1	0.01	50	3			
3	WG-715		47.1	24.1	–	–	1	0.01	100	0.2			
4	TG-704	Дистиллированная	43.2	35.2	3.3	1.2	4.3	0.08	160	0.2	1	22	8
5	WG-705	ЛГ	77.4	54.4	1.3	0	2.4	0.02	25.0/55.0	1.7	17	37	23
6	TG-703		56.9	48.9	3.3	2.5	4.4	0.06	40	1.1		22	8
7	WG-716	НЕФТЕНОЛ ВУПАВ	57.3	34.3	–	–	0.2	0	100	0.2	81	37	23
8	WG-717	Полигель	71.7	48.7	–	–	2.2	0.02	40	1.2	95	37	23
9	WG-722	ДС-2	39.23	31.2	0.6	0.9	2.8	0.01	20	1.6	102	22	8
10	WG-711	ПАС	50.4	27.4	–	–	4	0.02	10	2.2	153	37	23
11	WG-714		53.9	30.9	–	–	4	0.02	10	2.3			
12	WG-706	ДС-1	65.7	42.7	1.2	0.2	2.4	0.02	25	1.8	710	37	23
13	WG-708		65.5	42.5	4.2	1.6	4.4	0.04	20	1.6			
14	WG-723	ПМС-1000	52.72	44.7	23	1.8	15	0.06	2.2/5.5	13	1 000	22	8
15	TG-701		58.9	50.9	25	2.4	16	0.1	3.5	8.7			
16	WG-721	ДС-3	39.9	31.9	0.2	4	2	0.03	15	3.5	1220	22	8
17	TG-717		59.4	51.4	6.4	8.2	14	0.07	28	1			
18	WG-719	ПМС-10000	57.9	49.9	10	11	18	0.09	0.4/1.4	94	10 000	22	8
19	WG-713	ПМС-100000	63.2	55.2	64	64	64	0.39	0.1/1.0	220	100 000	22	8

3.1.3 Выводы к разделу 3.1

Разработанная специальная методика физического моделирования инициации и распространения трещины гидроразрыва в лабораторных условиях с непрерывным мониторингом роста трещины гидроразрыва улучшенной трехкомпонентной системой наблюдений (высокочувствительные пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии, которые были специально сконструированы и изготовлены для регистрации сигналов акустической эмиссии в условиях высокого давления, обжимающего образец масла, датчики деформации образца, датчики давления и объема жидкости гидроразрыва) позволяет проводить прямые измерения параметров трещины гидроразрыва в целевых породах и комплексный анализ динамики её распространения [Шевцова, 2023].

Для экспериментов гидроразрыва в псевдо-трехосных условиях нагружения были использованы жидкости на водной и безводной основе для инициации трещины гидроразрыва в цилиндрических образцах. В отличие от традиционно используемых сшитых жидкостей на основе раствора гуара, они имеют структурное отличие. Часть жидкостей для лабораторных экспериментов были предоставлены сотрудниками кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» в рамках сотрудничества отделений научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Измерения ширины раскрытия трещины гидроразрыва и объема жидкости, закачиваемой в трещину, были произведены в момент достижения трещиной цилиндрической поверхности образца. В случае закачки высоковязкой жидкости гидроразрыв распространялся медленнее, экстензометры регистрировали большое удлинение образца, вызванное раскрытием трещины, и гидроразрыв произошел при самом высоком максимальном давлении среди всех испытаний. Полученные выводы хорошо согласуются с предыдущей публикацией [Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015].

3.2 Результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва на образцах трещиноватых магматических горных пород (трещиноватый Ташмурунский гранит)

3.2.1 Дизельная система 3 (ДС-3)

В своих статьях [Llanos и др., 2017; Zhang, Zhang, Sun, 2021] выявили что распространение трещины гидроразрыва в горной породе осложняется присутствием естественных трещин. Чтобы оценить охваченный воздействием гидроразрыва объём пласта (Stimulated reservoir volume) и эффективность полевых работ, необходимо понять, как инициированная трещина гидроразрыва взаимодействуют с природными трещинами и

неоднородностями. Описанные далее лабораторные эксперименты были проведены для изучения особенностей взаимодействия трещины гидроразрыва с присутствующими в образце (искусственно созданными трещинами, имитирующими природные) трещинами.

Данные эксперименты проводились в образцах трещиноватого Ташмурунского гранита, свойства которого описаны в разделе 2.3.3. Достаточно плотная сеть трещин была создана искусственно путем высокотемпературного нагрева подготовленных образцов TG-714h и TG-715h в муфельной печи до 800°C с целью воссоздания трещиноватого материала, похожего на хрупкий, трещиноватый сланец. Стоит отметить, что образец TG-714h был протестирован в сухом состоянии, в то время как образец TG-715h был насыщен минеральным маслом Multitherm PG-1 (вязкость 46 сП) для воссоздания состояния естественного флюидонасыщения. Во время эксперимента поровое давление в насыщенном образце TG-715h поддерживалось постоянным и составляло 1 МПа. В оба образца для инициации трещины гидроразрыва закачивалась одинаковая жидкость ДС-3 со скоростью 5 мл/мин.

Рисунок 77 демонстрирует сравнение параметров, зарегистрированных во время закачки жидкости в сухой (слева) и насыщенный (справа) образцы, подвергшиеся высокотемпературной обработке. Стоит обратить внимание на то, что давление жидкости в стволе скважины (Рисунок 77, a,d) линейно возрастает на начальной стадии закачки жидкости и позже начинает отклоняться от линейного тренда. Рисунок 77c,f показывает, что примерно в то же время, когда кривая давления начала отклоняться от линейного тренда, а это при давлениях жидкости 26,7 и 16,5 МПа в образцах TG-714h и TG-715h, соответственно, наблюдается возникновение утечки закачиваемой жидкости в трещиноватую матрицу горной породы. Скорости утечки жидкости гидроразрыва составляли 2,8 мл/мин и 1,8 мл/мин в сухом (TG-714h) и насыщенном (TG-715h) образцах соответственно. Поскольку скорость закачки жидкости была равна 5 мл/мин и превышала скорость утечки жидкости гидроразрыва в трещиноватую матрицу, то трещина гидроразрыва была успешно инициирована в обоих образцах. На основании полученных экспериментальных результатов, можно предположить, что если бы жидкость гидроразрыва закачивалась со скоростью меньшей или равной скорости утечки, то было бы невозможно успешно инициировать трещину гидроразрыва. Таким образом, данные экспериментальные исследования подтвердили, что для успешной инициации трещины гидроразрыва в естественно трещиноватых горных породах необходимо создавать скорость закачки жидкости гидроразрыва превышающую скорость утекания жидкости в трещиноватую горную породу.

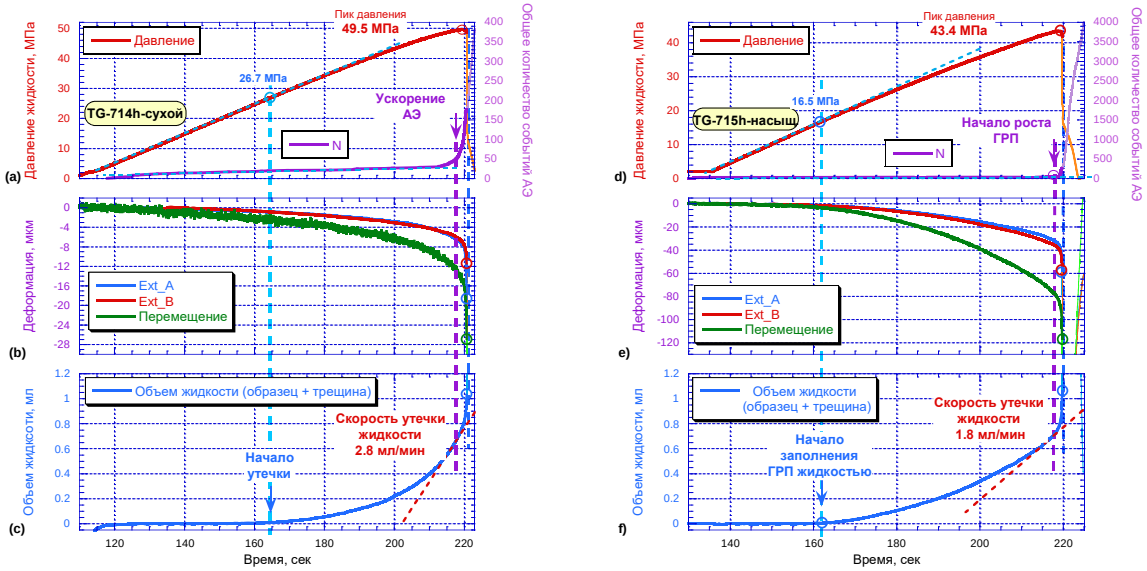


Рисунок 77**.** Образцы TG-714h сухой (слева) и TG-715h насыщенный (справа): (a), (d) давление жидкости (красный) и общее количество сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (e) осевая деформация, измеренная левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) датчиками деформации и кривая, демонстрирующая положение поршня (зеленый); (c), (f) объем жидкости, закачиваемой в трещину гидроразрыва. Все параметры были построены в зависимости от времени эксперимента.

Таблица 22 демонстрирует сравнение полученных экспериментальных результатов. Отметим, что скорость утечки жидкости в сухом образце TG-714h почти в два раза выше, чем в насыщенном образце TG-715h. Удлинение сухого образца, вызванное раскрытием трещины гидроразрыва, составляет 11 микрон, что в три раза больше аналогичного параметра в насыщенном образце. Однако объемы жидкости, закачанные в инициированную трещину гидроразрыва, почти одинаковы: 0,24 мл (сухой образец) и 0,28 мл (насыщенный образец).

Таблица 22. Результаты экспериментов гидроразрыва в трещиноватых образцах TG-714h (сухой) и TG-715h (насыщенный).

№ образцаd	**TG-714h**	**TG-715h**
Состояние горной породы	**Сухая**	**Насыщенная**
Жидкость гидроразрыва	ДС-3	ДС-3
Скорость закачки жидкости, мл/мин	5	5
Скорость утечки жидкости, мл/мин	2.80	1.78
σ_1, МПа	22	22
σ_3, МПа	8	8
Вязкость жидкости гидроразрыва при 100 $с^{-1}$, сП	1220	1220
Давление гидроразрыва, МПа	49.6	43.4
Раскрытие трещины, мкм	11	32
Объем жидкости в трещине, мл	0.24	0.28
Скорость распространения трещины, мм/сек	14	24
Интервал времени от момента инициации АЭ до регистрации давления гидроразрыва, сек	1.6	0.5

Процесс инициации и распространения трещины гидроразрыва был разделен на три стадии (Рисунок 78): начальная стадия (a) распространения трещины, достижение трещиной цилиндрической поверхности образца – стадия (b) и стадия (c) – смыкание стенок трещины.

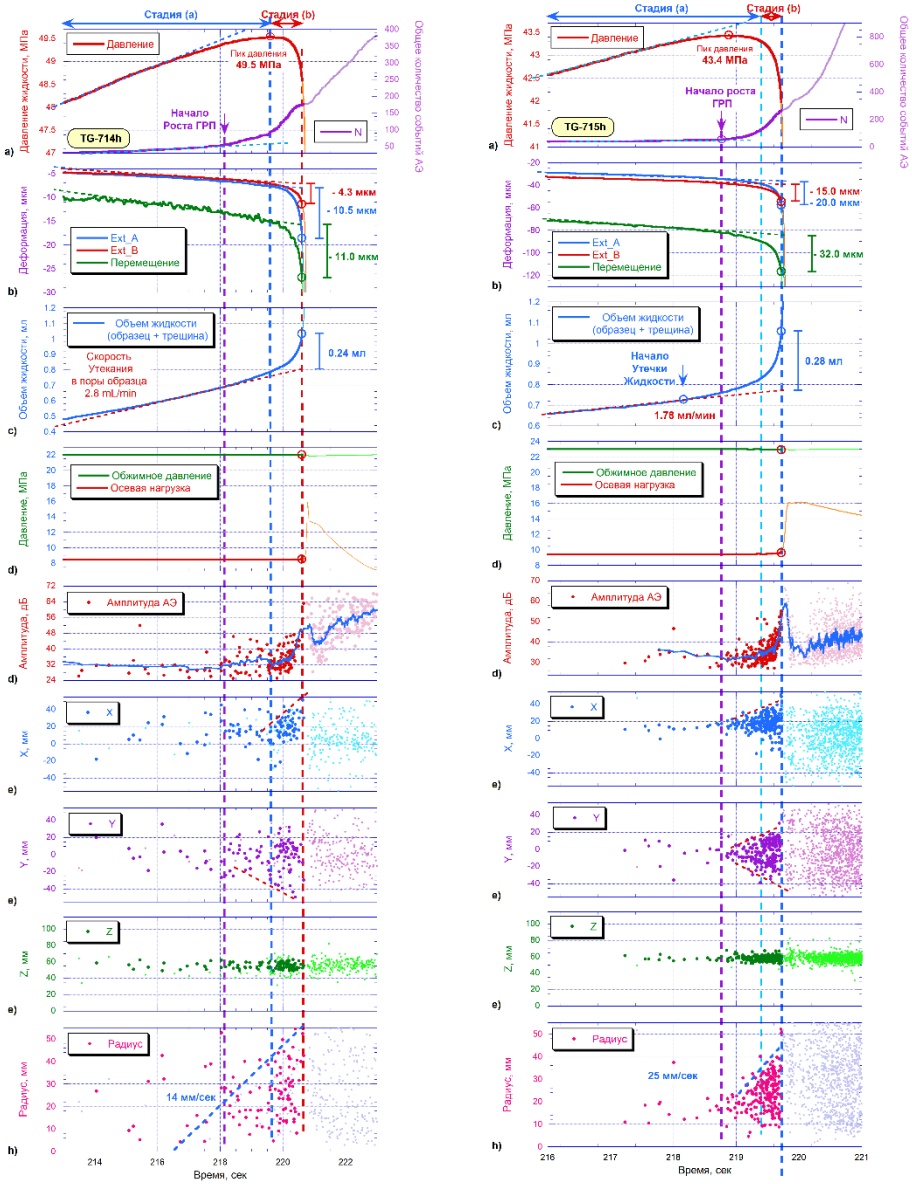


Рисунок 78**.** Результаты испытаний образцов TG-714h сухой (слева) и TG-715h насыщенный (справа): (a) давление жидкости (красный) и общее количество сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевая деформация, измеренная левым (Ext_B, красный) и правым (Ext_A, синий) экстензометрами и кривая, демонстрирующая положение загрузочного поршня (зеленый); (c) объем жидкости, закачиваемой в гидроразрыв; (d) амплитуда сигналов АЭ; (e) и (f) горизонтальные координаты расположенных сигналов АЭ в направлениях X и Y соответственно; (g) вертикальные координаты расположенных сигналов АЭ. Сигналы АЭ; (h) распределение расстояний между расположенными сигналами АЭ и осью образца. Все параметры отображаются в зависимости от времени тестирования образца.

Важно отметить, что момент, когда трещина гидроразрыва достигла цилиндрической поверхности образца, совпал с ярко выраженным пиком амплитуды

(Рисунок 78, красная пунктирная линия). Кроме того, скорость распространения трещины в сухом образце примерно вдвое ниже, чем в насыщенном образце. Очевидным объяснением является более быстрое перераспределение давления в насыщенной горной породе.

Рисунок 79 демонстрирует три ортогональные проекции залоцированных сигналов АЭ, разбиение которых по времени соответствует описанных ранее стадиям. Проекции «вид сверху» демонстрируют направление распространения трещины гидроразрыва. В образце TG-714h на стадии (a) трещина распространялась вблизи ствола скважины в юго-восточном секторе. Во время стадии (b) было зафиксировано увеличение числа акустических событий, и сектор распространения трещины сохранил свое направление, но стал шире.

В образце TG-715h на стадии (a), трещина гидроразрыва росла в довольно узком юго-восточном секторе. На стадии (b) было зафиксировано увеличение числа акустических событий, направление роста трещины сохранилось. Стадия закрытия трещины (c) демонстрирует рассеяние событий АЭ по всему поперечному сечению образца.

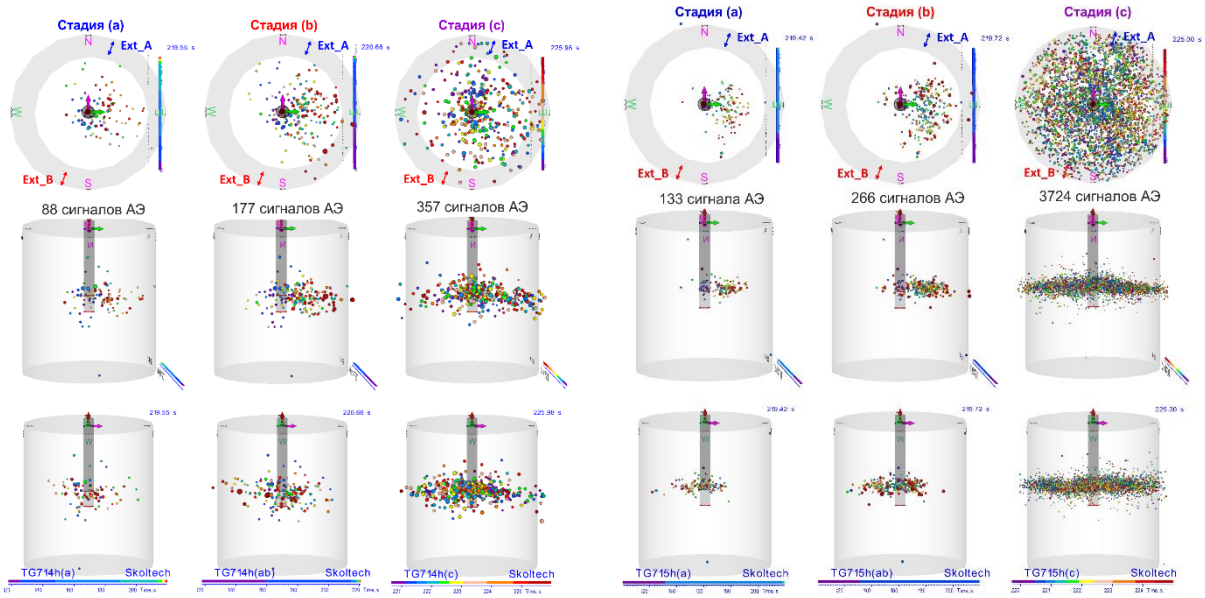


Рисунок 79. Три ортогональные проекции положений сигналов АЭ в пространстве образцов TG-714h (слева) и TG-715h (справа).

3.2.2 Выводы к разделу 3.2

В этом разделе было исследовано распространение трещины гидроразрыва в сухом и насыщенном трещиноватых образцах Ташмурунского гранита. Экспериментально было выявлено, что утечка закачиваемой жидкости гидроразрыва в трещиноватую матрицу сухого образца TG-714h больше, чем в насыщенном. К тому же, параметры трещины гидроразрыва, инициированной в насыщенном образце TG-715h, представлены меньшим значением давления гидроразрыва, большим значением раскрытия трещины, меньшим

значением скорости утечки закачиваемой жидкости. Выполненные экспериментальные исследования показали, что скорость утечки жидкости гидроразрыва в естественно трещиноватую матрицу горной породы следует учитывать при планировании и разработке дизайна операций гидроразрыва пласта. Данные экспериментальные исследования подтвердили, что для успешной инициации трещины гидроразрыва в естественно трещиноватых горных породах необходимо создавать скорость закачки жидкости гидроразрыва превышающую скорость утекания. Результаты данного исследования опубликованы в [Shevtsova и др., 2023].

3.3 Результаты компьютерной томографии и лазерного сканирования стенок (поверхностей) трещины гидроразрыва, полученных в цилиндрических образцах

В отличие от истинно трехосного пресса, где жидкость гидроразрыва может свободно вытекать из негерметичного образца, в псевдо-трехосном прессе каждый цилиндрический образец был помещен в непроницаемый кожух, который является преградой для жидкости, используемой при создании обжимного давления. Это означает, что после достижения трещиной цилиндрической поверхности образца, жидкость гидроразрыва растекалась под непроницаемой оболочкой по цилиндрической поверхности образца, и, скорее всего, изменяла распределение напряжений внутри образца, влияя на направление распространения и форму трещины гидроразрыва. Поэтому, статистические параметры трещины гидроразрыва были рассчитаны на начальной стадии роста. Выделение начальной стадии распространения трещины гидроразрыва было выполнено на основе анализа зарегистрированных акустических событий на начальных стадиях эксперимента.

Рисунок 80 (верхний ряд графиков) демонстрирует проекцию «вид сверху» на координаты сигналов АЭ, зарегистрированных на начальной стадии (а) распространения трещины гидроразрыва. Как правило, при закачке маловязких жидкостей гидроразрыва сигналы АЭ сосредоточены в одном секторе, который в последующем будет использован для расчета статистических параметров инициированной поверхности. Рисунок 80 (средний ряд графиков) демонстрирует двухмерные карты рельефа всей поверхности инициируемой трещины гидроразрыва, построенные на основе результатов компьютерной томографии или лазерного сканирования образцов после эксперимента. Рисунок 80 (нижний ряд графиков) демонстрирует двухмерную карту рельефа поверхности начальных секторов, выявленных на основе акустических данных, и которые и будут исследоваться.

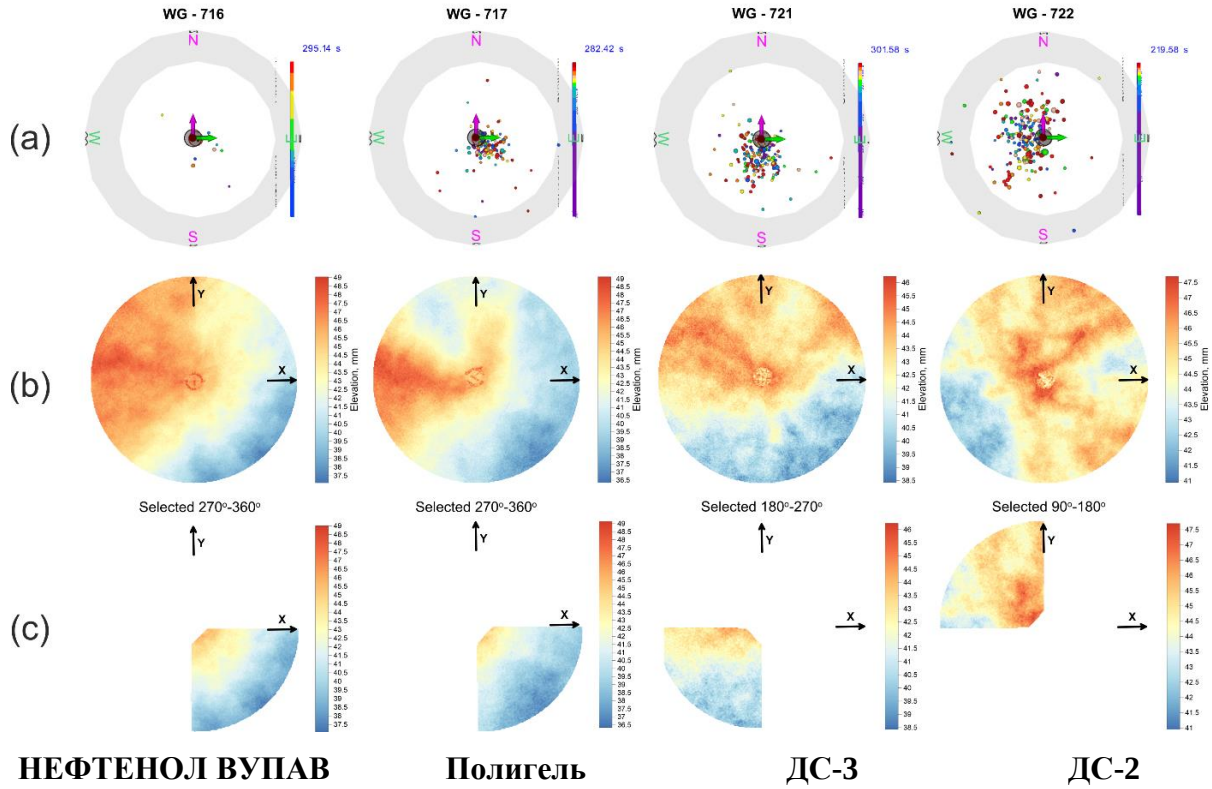
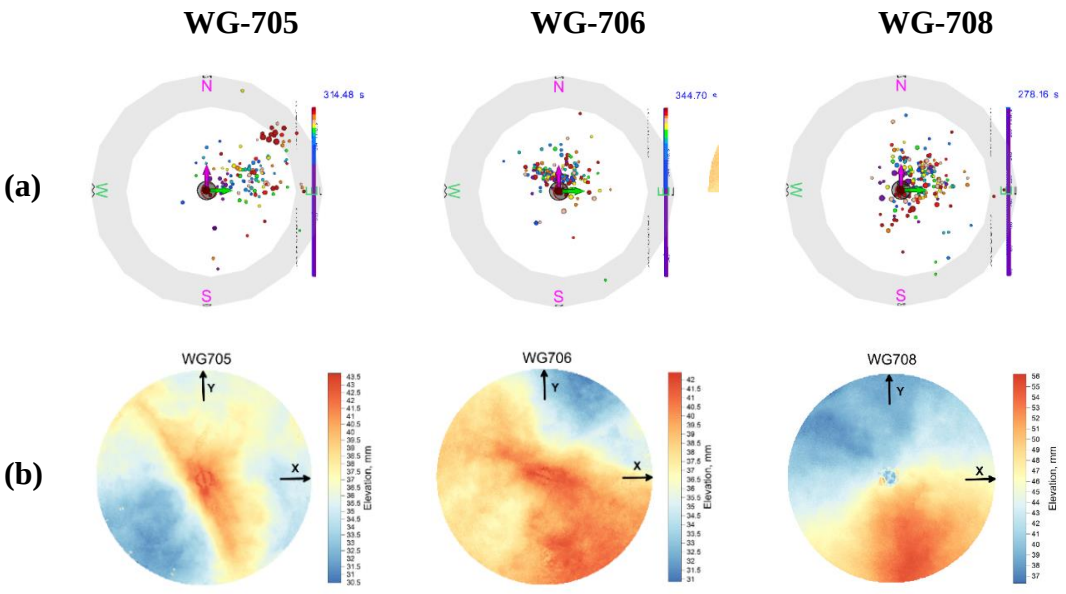


Рисунок 80. Вид сверху: (a) сигналы АЭ, зарегистрированные на начальной стадии (a) распространения трещины гидроразрыва, (b) двумерные карты поверхности инициированной трещины гидроразрыва и (c) секторы, выбранные для анализа топографии трещины гидроразрыва, инициированной жидкостями: НЕФТЕНОЛ ВУПАВ, Полигель, ДС-3 и ДС-2.

Аналогичный набор данных для анализа поверхности трещины гидроразрыва, инициированной различными жидкостями, был подготовлен для цилиндрических образцов Покостовского гранита (Рисунок 81–Рисунок 84).



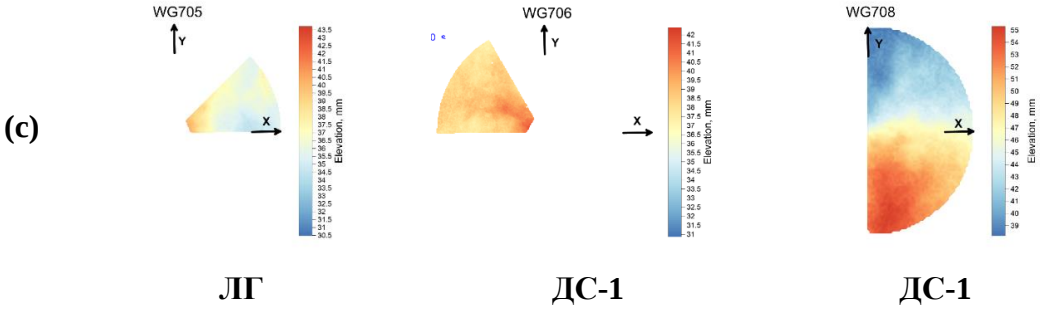


Рисунок 81. Вид сверху: (a) сигналы АЭ, зарегистрированные на начальной стадии (a) распространения трещины гидроразрыва, (b) двумерные карты поверхности инициированной трещины гидроразрыва и (c) секторы, выбранные для анализа топографии трещины гидроразрыва, инициированной жидкостями: ЛГ и ДС-1.

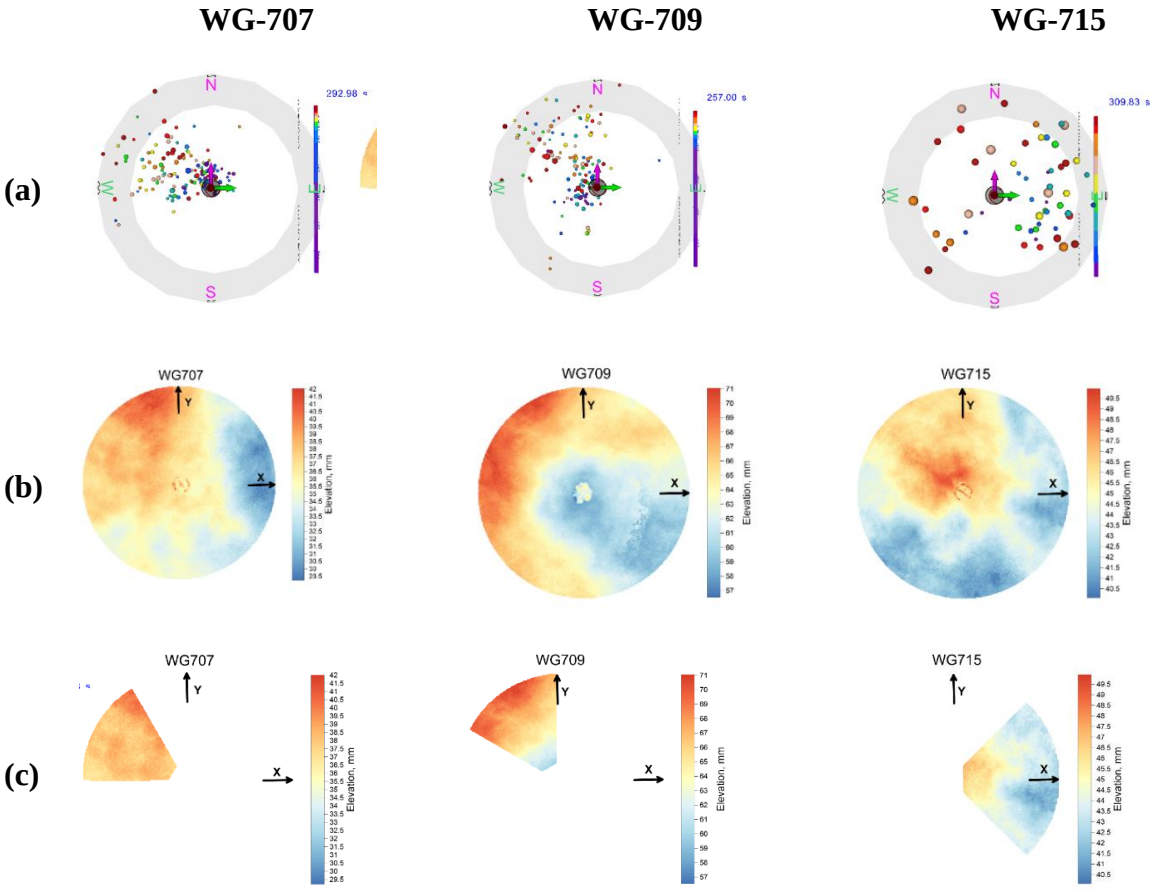
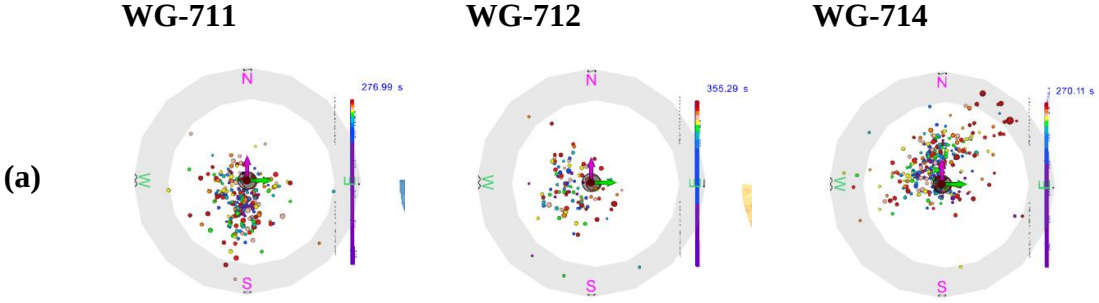


Рисунок 82. Вид сверху: (a) сигналы АЭ, зарегистрированные на начальной стадии (a) распространения трещины гидроразрыва, (b) двумерные карты поверхности инициированной трещины гидроразрыва и (c) секторы, выбранные для анализа топографии трещины гидроразрыва, инициированной L-CO_2.



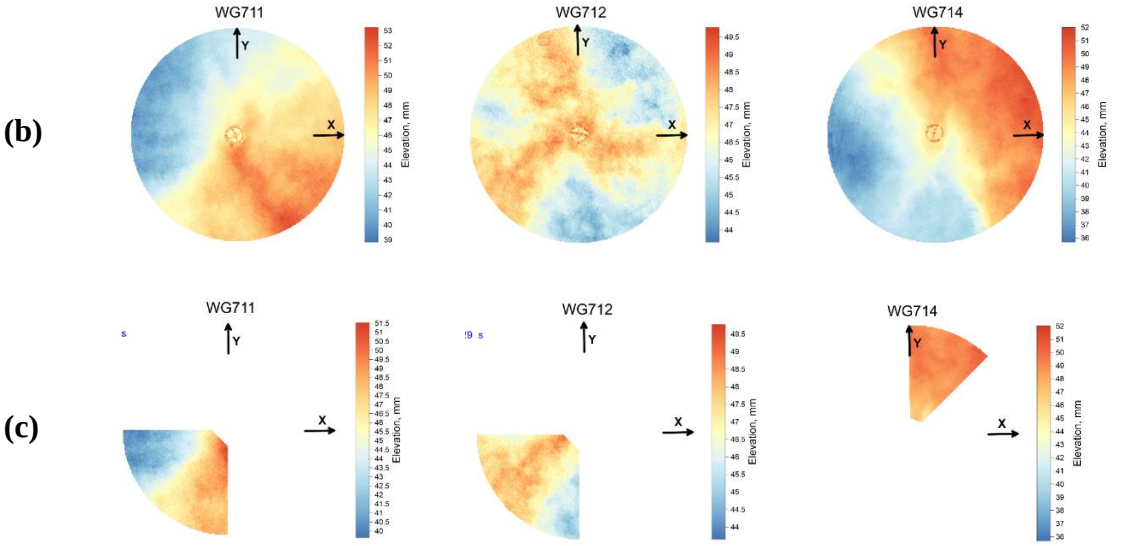


Рисунок 83. Вид сверху: (a) сигналы АЭ, зарегистрированные на начальной стадии (a) распространения трещины гидроразрыва, (b) двумерные карты поверхности инициированной трещины гидроразрыва и (c) секторы, выбранные для анализа топографии трещины гидроразрыва, инициированной ПАС.

В случае радиальной формы распространения трещины гидроразрыва, как это наблюдается при закачке силиконовых масел, можно использовать любой сектор для анализа параметров шероховатости.

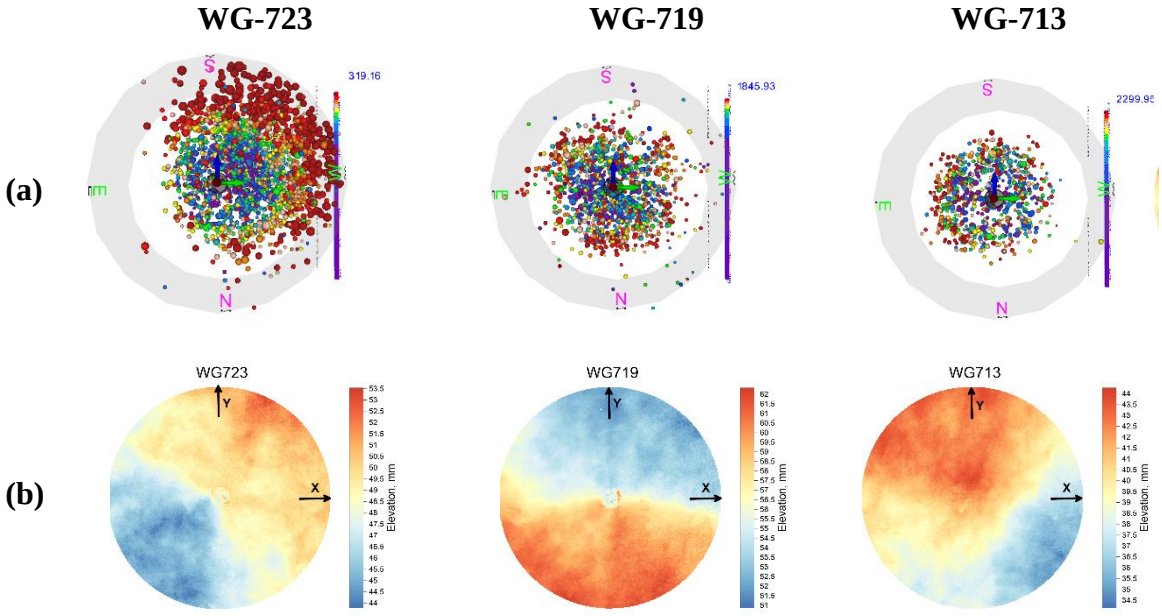
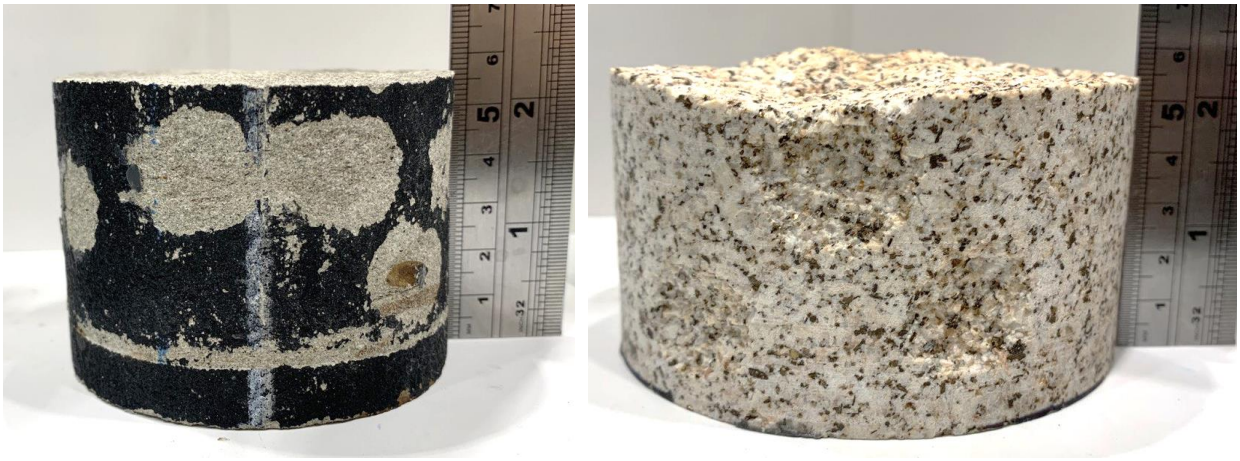


Рисунок 84. Вид сверху: (a) сигналы АЭ, зарегистрированные на начальной стадии (a) распространения трещины гидроразрыва, (b) двумерные карты поверхности инициированной трещины гидроразрыва, инициированной силиконовыми маслами различной вязкости (1000 сП, 10 000 сП и 100 000 сП).

Анализ шероховатости стенки (поверхности) трещин гидроразрыва показал, что песчаник GM6-102 характеризуется практически плоской поверхностью трещин в отличие

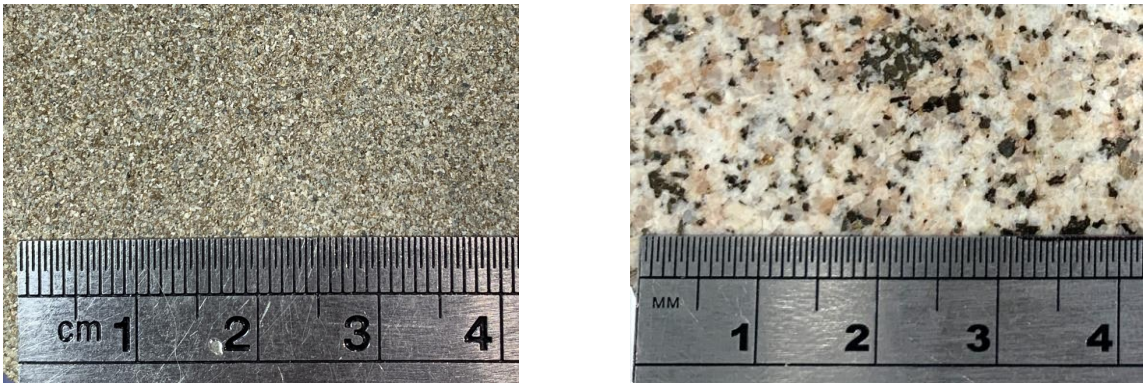
от трещиноватого гранита TG-714h, который имеет значительно выраженную шероховатую поверхность трещины гидроразрыва (Рисунок 85). Поэтому, для повышения точности расчетов моделирования гидроразрыва в полевых условиях необходимо учитывать структуру пород.



GM6-102 **TG-714h**

Рисунок 85. Фотографии нижней части образца после эксперимента гидроразрыва для GM6-102 (слева) и TG-714h (справа).

Рисунок 86 демонстрирует сравнение размеров зерен песчаника и трещиноватого гранита. Размер зерен песчаника составляет до 0,5 мм, тогда как размер зерен трещиноватого гранита – 3-5 мм.



Песчаник **Трещиноватый гранит**

Рисунок 86. Внешний вид поперечного среза песчаника (слева) и трещиноватого Ташмурунского гранита (справа).

Лазерное сканирование созданных стенок (поверхностей) трещины гидроразрыва позволило получить трехмерные изображения поверхностей трещин с точностью до 50 микрон. Рисунок 87a демонстрирует 2D-карты топографии поверхности трещин, построенные по результатам лазерного сканирования образцов после эксперимента. Рисунок 87b демонстрирует вид сверху на распределение сигналов АЭ, залоцированных на начальной стадии эксперимента, когда трещина гидроразрыва не достигла цилиндрической поверхности образца, а жидкость не распространилась по цилиндрической поверхности

образца под непроницаемой оболочкой и не вызвала изменения распределения напряжений внутри образца. Рисунок 87c демонстрирует сектор поверхности трещины, который был выбран для анализа параметров поверхности трещины гидроразрыва на основе пространственного распределения событий АЭ на начальной стадии эксперимента (Рисунок 87b).

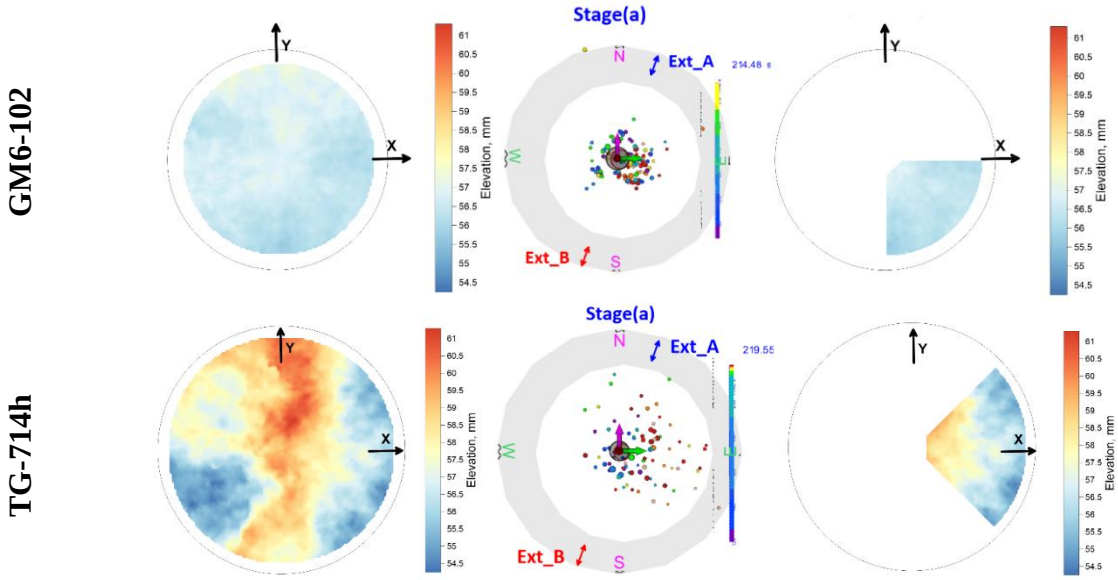


Рисунок 87. Вид сверху: (a) двумерные карты поверхности полученной в эксперименте трещины гидроразрыва, инициированной закачкой ДС-3; (b) сигналы АЭ, зарегистрированные на начальной стадии распространения трещины гидроразрыва; (c) секторы, выбранные для анализа топографии трещины гидроразрыва.

Таблица 23 показывает сравнение основных статистических параметров шероховатости поверхности для сухих образцов песчаника GM6-102 и трещиноватого гранита ТГ-714. Для образца трещиноватого гранита этот параметр в три раза больше, чем для образца песчаника. Сравнение значений среднеквадратичной шероховатости R_{rms} и извилистости подтверждает количественно различие между формами созданных поверхностей трещины гидроразрыва (Рисунок 85): трещиноватый гранитный образец TG-714h имеет бóльшие значения R_{rms} и извилистости, чем образец песчаника GM6-102. В нашем исследовании мы показали, что структура породы и размер зерна оказывают существенное влияние на морфологию поверхности разрушения.

Таблица 23. Сравнение статистических параметров шероховатости поверхности образцов песчаника и трещиноватого гранита (Уравнения 7–9).

№ образца	**R_p, мм**	**R_m, мм**	**R_{rms}, мм**	**Извилистость**	**$Z_{1\text{-}2}$, мм**
GM6-102	0.62	0.15	0.19	1.01	1.08
TG-714h	1.90	0.45	0.55	1.10	3.34

Таблица 24 демонстрирует рассчитанные статистические параметры стенок (поверхностей) трещины гидроразрыва, рассчитанные как для всей поверхности

инициированной трещины гидроразрыва, так и для сектора, где трещина распространялась только на начальной стадии (а).

Таблица 24. Статистические параметры шероховатости поверхности исследованных образцов (Уравнения 7–9).

	Вся поверхность			Сектор поверхности				
№ образца	$\mathbf{R_m}$	$\mathbf{R_{rms}}$	$\mathbf{R_p}$	$\mathbf{R_m}$	$\mathbf{R_{rms}}$	$\mathbf{R_p}$	Дин. вязкость при 100 $с^{-1}$	Жидкость ГРП
-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	сР	-
WG-705	1.59	1.94	8.69	0.72	0.90	5.12	17.00	ЛГ
WG-706	1.42	1.65	4.26	0.55	0.68	2.03	710.00	ДС-1
WG-707	1.23	1.49	4.31	0.59	0.72	2.00	0.13	L-CO_2
WG-708	1.34	1.66	5.16	1.02	1.30	4.63	710.00	ДС-1
WG-709	1.44	1.82	5.95	0.79	0.99	3.03	0.13	L-CO_2
WG-711	0.99	1.24	5.13	0.91	1.13	3.66	153.00	ПАС
WG-712	0.80	0.97	2.88	0.62	0.76	2.55	153.00	ПАС
WG-714	1.06	1.31	4.75	0.55	0.69	2.92	153.00	ПАС
WG-715	1.07	1.36	5.40	0.65	0.81	2.65	0.13	L-CO_2
WG-722	0.62	0.76	2.29	0.62	0.76	2.29	102.00	ДС-2
WG-716	0.55	0.67	1.94	0.55	0.67	1.94	81.00	НЕФТЕНОЛ ВУПАВ
WG-717	0.61	0.75	2.21	0.61	0.75	2.21	95.00	Полигель
WG-721	0.65	0.74	1.92	0.65	0.74	1.92	1220.00	ДС-3
WG-723	0.69	0.86	3.24	0.60	0.73	2.10	1000.00	ПМС-1000
WG-719	0.78	0.96	3.07	0.39	0.70	2.64	10000.00	ПМС-10000
WG-713	0.80	0.99	3.72	0.55	0.58	2.44	100000.00	ПМС-100000

Рисунок 88 демонстрирует взаимосвязь между статистическим параметром шероховатости (R_{rms}) и вязкостью жидкости, инициирующей трещину гидроразрыва. Графики, где показана среднеквадратичная шероховатость R_{rms}, рассчитанная для всей поверхности трещины (Рисунок 88, слева) и для сектора начального распространения трещины (Рисунок 88, справа), не демонстрируют хорошую взаимосвязь По-видимому, крупнозернистая структура гранита имеет решающее значение для определения шероховатости.

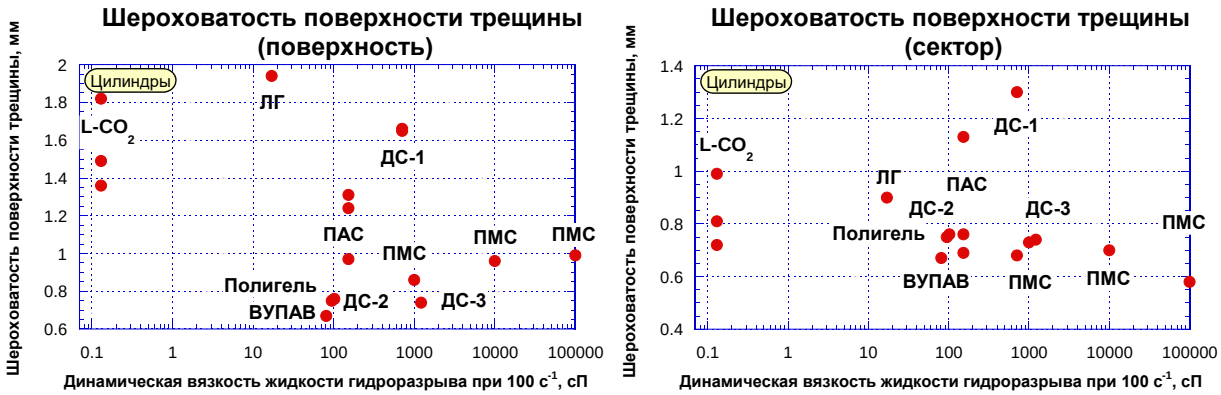


Рисунок 88. Взаимосвязь между статической шероховатостью R_{rms} всей поверхности (слева), статистической шероховатостью R_{rms} сектора начальной стадии распространения трещины (справа) и вязкостью жидкости, инициирующую трещину гидроразрыва.

Таблица 25 демонстрирует значения извилистости трещины гидроразрыва и жидкости, инициирующие данные трещины.

Таблица 25. Значения извилистости инициированной трещины гидроразрыва.

№ п.п.	№ образца	Извилистость	Жидкость ГРП
1	WG-707	1.40	L-CO_2
2	WG-709	1.41	L-CO_2
3	WG-715	1.42	L-CO_2
4	WG-705	1.34	ЛГ
5	WG-711	1.32	ПАС
6	WG-712	1.32	ПАС
7	WG-714	1.32	ПАС
8	WG-708	1.31	ДС-1
9	WG-706	1.31	ДС-1
10	WG-722	1.47	ДС-2
11	WG-716	1.41	НЕФТЕНОЛ ВУПАВ
12	WG-717	1.43	Полигель
13	WG-721	1.33	ДС-3
14	WG-723	1.31	ПМС-1000
15	WG-719	1.30	ПМС-10000
16	WG-713	1.26	ПМС-100000

В отличие от статистической шероховатости R_{rms}, этот параметр хорошо коррелирует с вязкостью закачиваемой жидкости: извилистость уменьшается с увеличением вязкости жидкости гидроразрыва (Рисунок 89). Эти результаты не противоречат существующими независимыми исследованиями [Chen, Nagaya, Ishida, 2015; Jia и др., 2020]. Также, важно отметить, что сочетание значительной извилистости и небольшого раскрытия, характерные для трещины гидроразрыва, инициированной маловязкой жидкостью, может вызвать проблемы для доставки и распределения расклинивающего агента (проппанта). Именно поэтому лабораторные эксперименты

гидроразрыва позволят оценить параметры поверхности (шероховатость, извилистость) и измерить напрямую характеристики трещины (раскрытие), которые позволят подобрать оптимальные жидкости гидроразрыва и проппант. Полученные лабораторные результаты должны быть приняты во внимание.

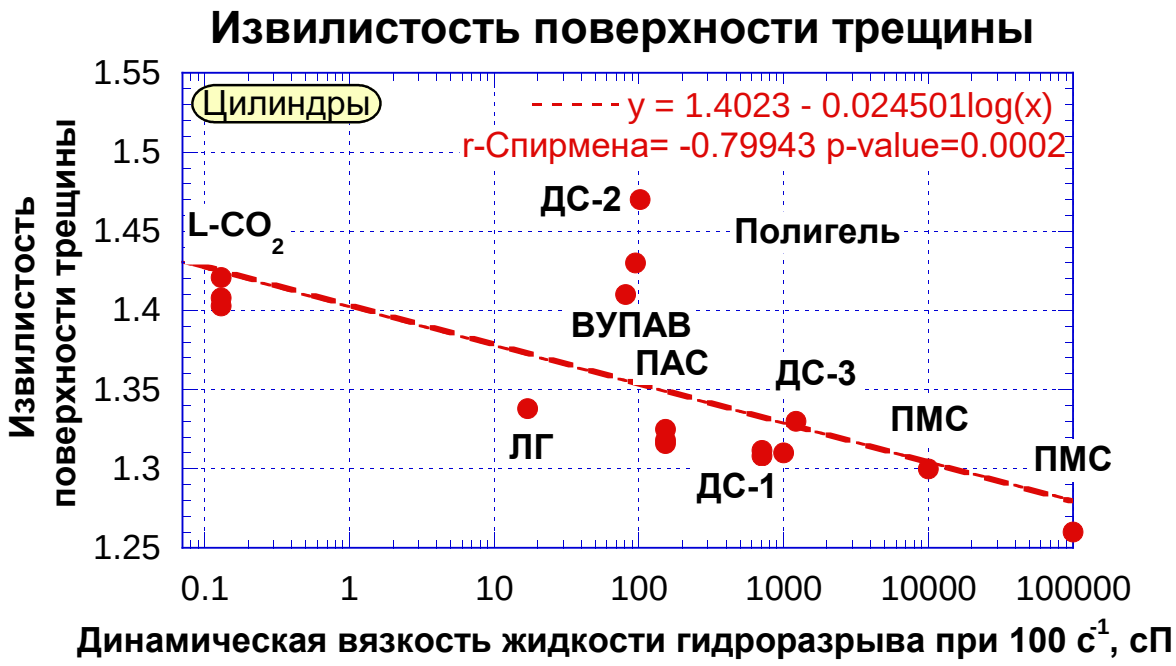


Рисунок 89. Взаимосвязь между извилистостью поверхности трещины и вязкостью жидкости гидроразрыва.

Выводы к разделу 3.3

В данном разделе были рассчитаны статистические параметры созданной поверхности (стенки) трещины гидроразрыва, такие как шероховатость R_{rms} и извилистость, выявлена взаимосвязь между этими параметрами и вязкостью жидкости, инициирующей трещину (Рисунок 88, Рисунок 89).

Значения извилистости уменьшались с увеличением вязкости жидкости гидроразрыва, что не противоречит выполненным ранее исследованиям [Jia и др., 2020] и [Chen, Nagaya, Ishida, 2015]. Поверхность трещины гидроразрыва, инициированная L-CO2 (жидкостью с наименьшей вязкостью) имела самую высокую извилистость (1,47) и, как следствие, наиболее сложную форму поверхности. В то время как поверхности трещины, инициированные ПМС-10 000 и ПМС-100 000 имеют наименьшее значение извилистости (1,33). Можно предположить, что шансы на успешную доставку проппанта выше в трещине с гладкой поверхностью, поскольку извилистость может создать дополнительное сопротивление потоку жидкости

4. Результаты экспериментов по инициации трещины гидроразрыва жидкостями различной вязкости, полученные на кубических (25 см×25 см×25 см) образцах магматических горных пород

4.1 Дизельная система 1 (ДС-1)

Рисунок 90 демонстрирует параметры трещины гидроразрыва, инициированной в лаборатории центра добычи углеводородов Сколтеха. Увеличение общего числа акустических событий произошло за 0,6 секунды до достижения максимального значения давления жидкости (Рисунок 90a, фиолетовая кривая). Возникновение акустической активности следует рассматривать как момент зарождения трещины гидроразрыва. Красная кривая иллюстрирует давление жидкости гидроразрыва. На 53,6 секунде от начала закачки жидкости давление достигает своего максимального значения – 23,2 МПа и после этого резко падает.

Синяя кривая (Рисунок 90b) описывает объем жидкости, поступивший в инициированную трещину гидроразрыва. Этот параметр был рассчитан путем вычитания из всего объема жидкости, закачанного в образец за время эксперимента, той части объема жидкости, поведение которой описывается линейной частью кривой, аналогично процедуре, описанной в [Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015]. Линейный участок кривой, как правило, описывает сжимаемость жидкости гидроразрыва и жесткость системы закачки. Жесткость системы закачки жидкости была рассчитана на основе анализа линейной части кривой давления жидкости (Рисунок 90a, красная кривая) и равна 10 МПа/мл. Подробности расчета этого параметра представлены в статье [Bobrova и др., 2021].

В тот момент, когда трещина гидроразрыва достигла боковой поверхности образца, в трещине был зарегистрирован объем жидкости гидроразрыва, равный 1,3 мл.

Стоит напомнить, что в данной установке постоянное давление, равное 4 МПа, в осевом (вертикальном) направлении (σ_3) создается и поддерживается плоским домкратом. Красная кривая (Рисунок 90b) показывает изменение объема жидкости, содержащейся в плоском домкрате. Выдавливание жидкости из плоского домкрата вызвано увеличением размера кубического образца в осевом (вертикальном) направлении и связанно с раскрытием трещины гидроразрыва. Изменение объема жидкости, содержащейся в плоском домкрате, показывает увеличение объема блока, по которому, согласно [Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015], можно оценить объем созданной трещины. Жидкость начинает выдавливаться из плоского домкрата в момент регистрации максимального давления в скважине.

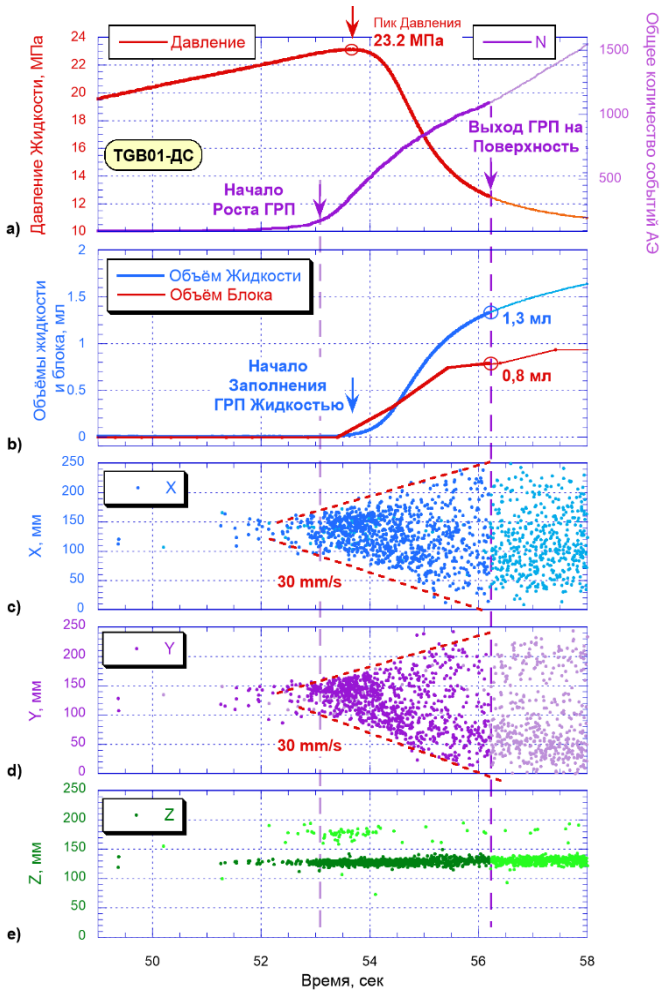


Рисунок 90. Образец TGB-01-ДС: (a) давление закачанной жидкости гидроразрыва (красный) и общее количество залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) объем жидкости, выдавленной из плоских домкратов (красный), и объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (синий); (c) и (d) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y соответственно; (e) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ. Все параметры отображаются в зависимости от времени эксперимента.

Анализ экспериментальных данных показывает, что сопоставление измерений, зарегистрированных тремя независимыми системами наблюдений: (1) деформация блока (Рисунок 90b, красная кривая), (2) возникновение акустической эмиссии (Рисунок 90a, фиолетовая кривая) и (3) объем закачанной в созданную трещину жидкости (Рисунок 90b, синяя кривая), подтверждают зарождение трещины на 53-й секунде закачки. Примерно через 0,5 секунды началось увеличение размера блока в вертикальном направлении (Рисунок 90b, красный), и примерно на 54-й секунде эксперимента трещина начала заполняться жидкостью (Рисунок 90b, синяя кривая). В момент достижения трещиной поверхности блока объем жидкости, выдавленной из плоских домкратов, составлял около 0,8 мл, а объем жидкости, заполнившей трещину – 1,3 мл. Оба объема были измерены независимо.

Следует отметить, что после того, как трещина гидроразрыва достигает боковой поверхности блока, то есть после завершения стадии (b), красная кривая (Рисунок 90b) показывает отсутствие дальнейшего раскрытия трещины гидроразрыва, в то время как синяя кривая (Рисунок 90b) продолжает свой рост, что связано с утечкой закачиваемой жидкости из блока через образовавшуюся трещину гидроразрыва.

Временно́е распределение координат X (Рисунок 90c) и Y (Рисунок 90d) залоцированных сигналов АЭ демонстрирует, что к моменту времени, обозначенному фиолетовой вертикальной пунктирной линией, сигналы АЭ были симметрично распределены во всем диапазоне значений оси X и оси Y. Распределение сигналов АЭ вдоль вертикальной оси Z (Рисунок 90e) подтверждает локализацию трещины гидроразрыва на уровне середины блока (Z = 125 мм).

Рисунок 91 демонстрирует три ортогональные проекции распределения локализованных сигналов АЭ в пространстве для трех стадий эксперимента гидроразрыва. Завершение стадии (a) соответствует моменту, когда были зарегистрированы 357 сигналов АЭ (что является половиной от общего количества сигналов АЭ, зарегистрированных в конце стадии (b)). Стадия (b) завершилась с достижением трещиной гидроразрыва боковой поверхности блока.

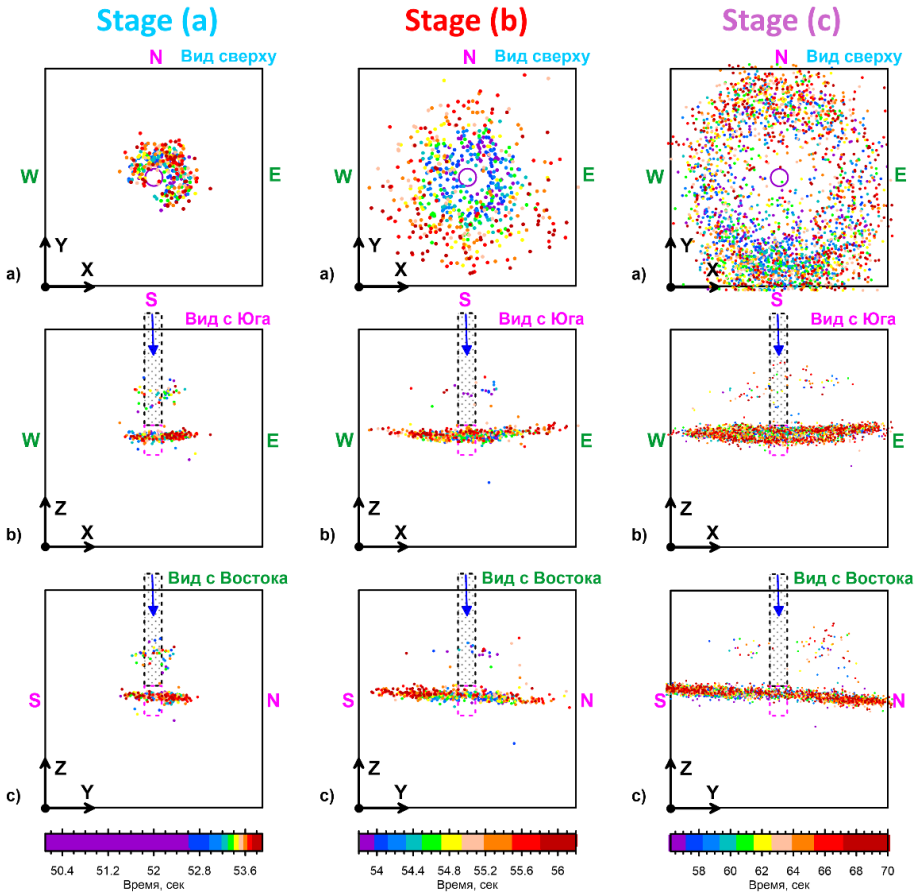


Рисунок 91. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца TGB-01-ДС для трех стадий развития трещины гидроразрыва: (a), (ab), (c).

Положение сигналов АЭ в трехмерном пространстве представлено в виде сфер, цвет которых соответствует шкале времени, показанной в нижней части проекций. Вид сверху на координаты зарегистрированных событий АЭ показывает увеличение площади распространения трещины гидроразрыва с течением времени. На стадии (a) наблюдается небольшое смещение облака акустических сигналов в северо-восточном направлении от скважины. На стадии (ab), показанной в средней колонке (Рисунок 91), облако акустических событий сместилось в юго-западном направлении от скважины. На стадии (c), показанной в левой колонке (Рисунок 91), отображены сигналы АЭ, зарегистрированные после достижения трещиной гидроразрыва боковой поверхности блока. Наибольшая активность также сохраняется в юго-западном секторе.

Рисунок 92 подтверждает совпадение координат залоцированных сигналов АЭ и фактического положения созданной поверхности гидроразрыва с точностью до 5 мм. Рисунок 92 демонстрирует фотографию нижней части кубического образца после эксперимента гидроразрыва.

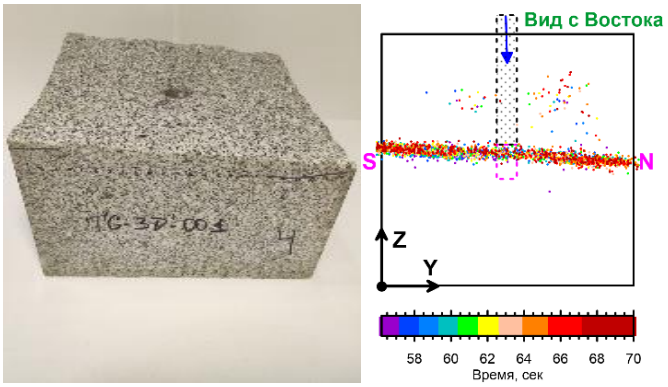


Рисунок 92. Фотография нижней части образца TGB-01-ДС после эксперимента гидроразрыва и соответствующая ей проекция АЭ.

4.2 Линейный гель (ЛГ)

Возникновение акустической активности наблюдалось на 76,7 секунде эксперимента (Рисунок 93a, фиолетовая кривая). Этот момент, обозначенный светло-фиолетовой вертикальной пунктирной линией (Рисунок 93), произошел примерно за 0,9 секунды до регистрации максимального давления жидкости, поэтому активация акустической эмиссии соответствует возникновению трещины гидроразрыва. Рисунок 93 описывает увеличение давления линейного геля (ЛГ), максимальное значение которого равно 25,9 МПа и было зарегистрировано на 77,6 секунде эксперимента (Рисунок 93a). Вскоре после достижения пикового значения давления жидкости гидроразрыва наблюдается быстрое падение давления в скважине. Объем жидкости, заполнивший трещину гидроразрыва, зарегистрированный в момент, когда трещина достигает поверхности образца, составляет 1,06 мл (Рисунок 93b, синяя кривая). К сожалению, в

образце TGB-05-ЛГ по технической причине насос не смог зарегистрировать значительное изменение объема жидкости в момент вскрытия трещины (Рисунок 93b, красная кривая).

Распределение сигналов по координатам X и Y показывает, что к моменту времени, обозначенному вертикальной пунктирной линией фиолетового цвета, сигналы АЭ располагались во всем диапазоне значений оси X с некоторой асимметрией сигналов вдоль оси Y (Рисунок 93c,d синие и фиолетовые точки). Распределение сигналов АЭ вдоль вертикальной оси Z (Рисунок 93e, зеленые точки), подтверждает локализацию трещины гидроразрыва на уровне середины блока (Z = 125 мм).

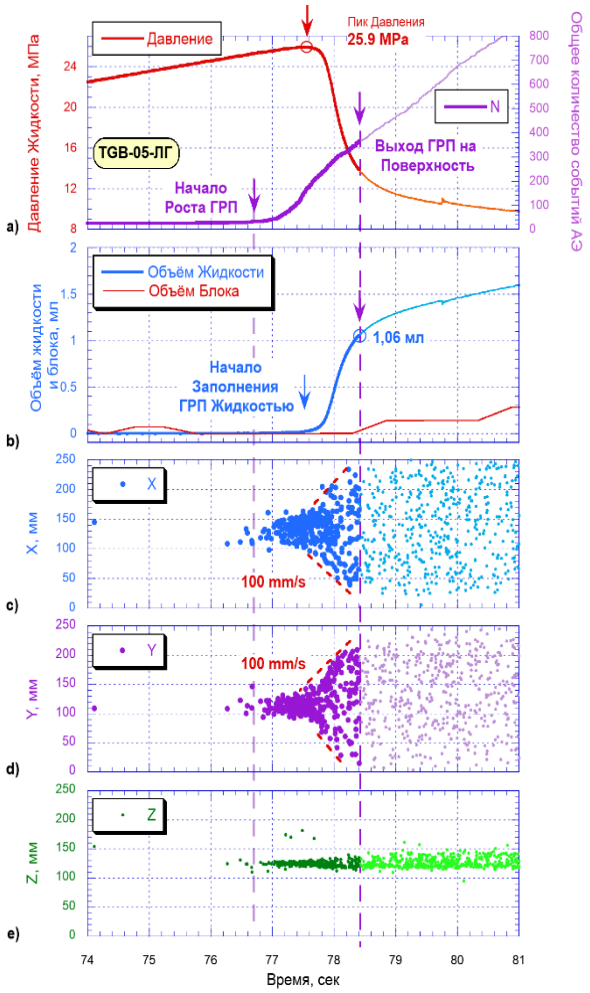


Рисунок 93. Образец TGB-05-ЛГ: (a) давление закачанной жидкости гидроразрыва (красный) и общее количество залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) объем жидкости, выдавленной из плоских домкратов (красный), и объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (синий); (c) и (d) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y соответственно; (e) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ. Все параметры отображаются в зависимости от времени эксперимента.

Рисунок 94 демонстрирует три ортогональные проекции распределения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для трех стадий. На стадии (a) наблюдается небольшое смещение акустических событий от центра скважины в юго-восточном направлении. На стадии (ab), показанной в средней колонке (Рисунок 94), акустические

события покрывают почти всё поперечное сечение образца. На стадии (c), показанной в левой колонке (Рисунок 94), отображены сигналы АЭ, зарегистрированные после выхода трещины гидроразрыва на поверхность блока. Наибольшая активность АЭ наблюдается в южной части блока.

Проекции «вид сбоку» на гранитный куб, показанные в среднем и нижнем рядах (Рисунок 94), показывают совпадение с точностью 5 мм координат сигналов АЭ и фактического положения созданной поверхности гидроразрыва (Рисунок 95). Средний ряд проекций (Рисунок 94) наглядно демонстрирует, что созданная поверхность (стенка) трещины гидроразрыва несколько отклоняется от горизонтального направления. Существует предположение, что такое отклонение может быть связано с некоторой локальной неоднородностью кубического образца TGB-05-ЛГ.

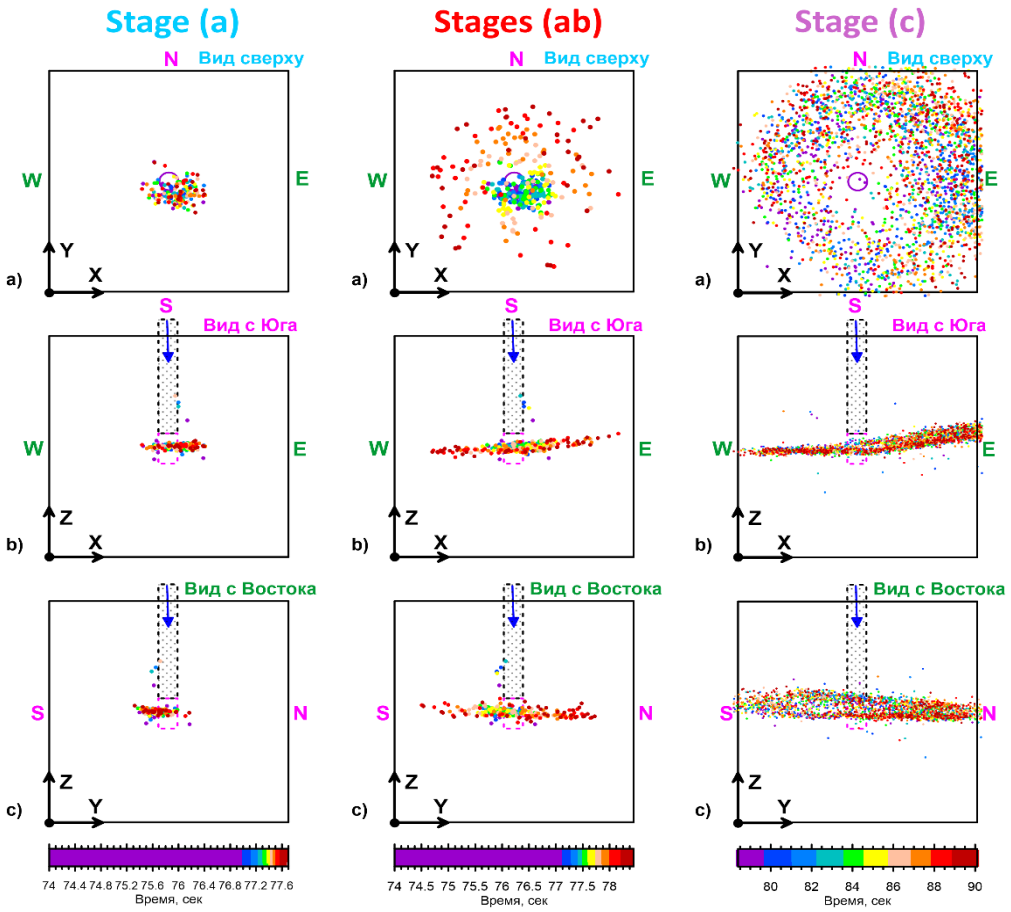


Рисунок 94. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца TGB-05-ЛГ для трех стадий развития трещины гидроразрыва: (a), (ab), (c).

Рисунок 95 демонстрирует фотографию нижней части кубического образца. Снимок также подтверждают некоторое отклонение трещины гидроразрыва, инициированной закачкой ЛГ, от направления, перпендикулярного направлению приложения минимальных главных напряжений.

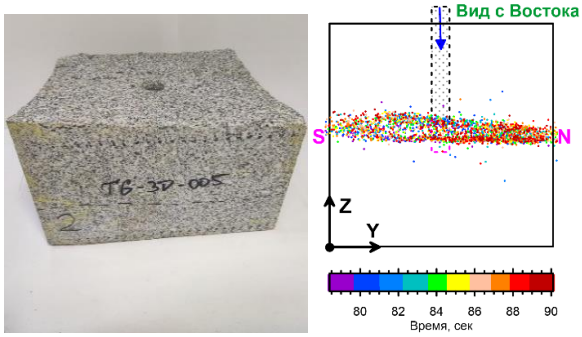


Рисунок 95. Фотография нижней части образца TGB-05-ЛГ после эксперимента гидроразрыва и соответствующая ей проекция АЭ.

4.3 Пенно-азотная система (ПАС)

Возникновение акустической активности было зарегистрировано на 911,0 секунде эксперимента (Рисунок 96a, фиолетовая кривая). Красная кривая описывает увеличение давления ПАС до его максимального значения, равного 19,06 МПа и зарегистрированного на 914,5 секунде эксперимента (Рисунок 96a). Только через 5 секунд (что является значительной задержкой для лабораторных экспериментов) наблюдается быстрое падение давления в скважине.

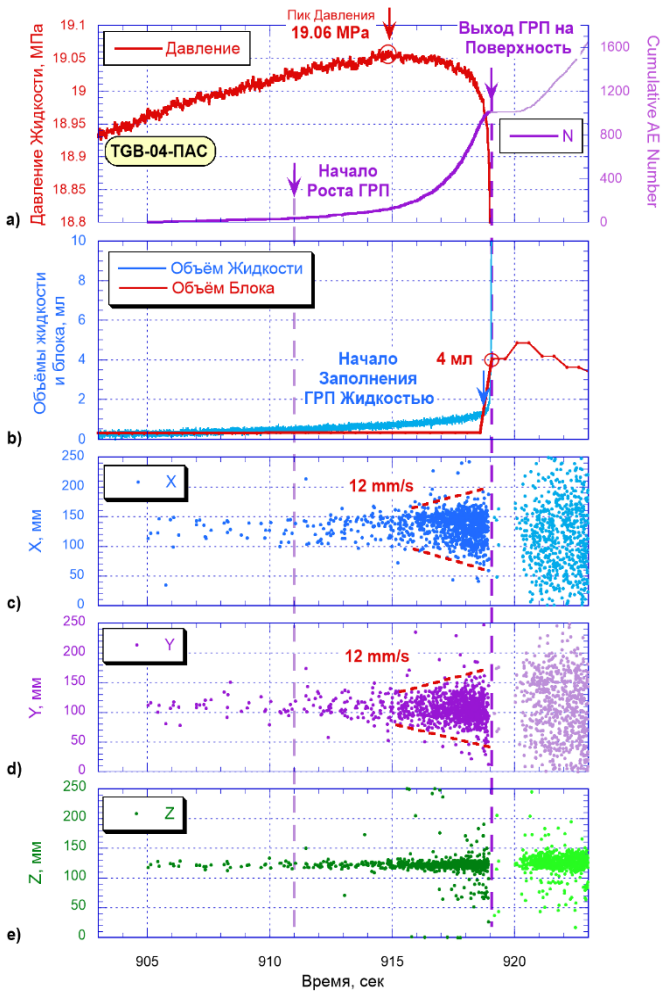


Рисунок 96. Образец TGB-04-ПАС: (a) давление закачанной жидкости гидроразрыва (красный) и общее количество залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) объем жидкости, выдавленной из плоских домкратов (красный), и объем жидкости, закачанной в

трещину гидроразрыва (синий); (c) и (d) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y соответственно; (e) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ. Все параметры отображаются в зависимости от времени эксперимента.

Объем жидкости, закачанной в образец (Рисунок 96b, синяя кривая), начал плавно увеличиваться примерно за 10 секунд до достижения пикового давления жидкости в скважине. В момент, когда трещина достигает боковой поверхности образца, было зарегистрировано резкое увеличение закачиваемого объема жидкости гидроразрыва, поэтому в данном эксперименте оказалось невозможным точно определить объем жидкости, которая заполнила трещину в момент достижения трещиной поверхности образца (Рисунок 96b, синяя кривая). Возможным объяснением резкого увеличения объема закачиваемой жидкости может быть очень быстрая дегазация ПАС с выделением газообразного азота. Дегазация ПАС происходит поскольку растворимость газа в закачиваемой жидкости сильно зависит от давления, которое резко падает при достижении трещиной поверхности образца. Несмотря на трудности точного определения объема жидкости гидроразрыва в трещине, оценить объем трещины можно по объему жидкости, выдавленному из плоских домкратов. В данном эксперименте выдавленный объем жидкости составляет 4 мл (Рисунок 96b, красная кривая).

Распределение сигналов АЭ в осям X и Y (Рисунок 96c,d) показывает достаточно симметричное распространение событий АЭ по оси X, и несколько смещенное в область меньших значений координат по оси Y. Распределение сигналов АЭ вдоль вертикальной оси Z (Рисунок 96e, зеленые точки), подтверждает локализацию трещины гидроразрыва на уровне середины блока (Z = 125 мм).

На стадии (a) наблюдается облако залоцированных событий АЭ, смещенное от скважины в западном направлении, которое продолжает распространяться со смещением в том же направлении на стадии (b) до момента достижения трещиной гидроразрыва поверхности блока (Рисунок 97, первое и второе изображение в верхнем ряду). После этого облако событий АЭ несколько смещается и остается локализованной в юго-западной части блока (Рисунок 97, третье изображение в верхнем ряду).

Проекции «вид сбоку», представленные в среднем ряду (Рисунок 97), демонстрируют локализацию событий АЭ с довольно хорошим соответствием с фактическим положением трещины гидроразрыва (Рисунок 98). Аналогично образцу TGB-05-ЛГ распределение залоцированных событий АЭ также отражает небольшое отклонение трещины гидроразрыва от сугубо горизонтального направления. Существует предположение, что такое отклонение может быть связано с некоторой природной трещиной, через которую начал просачиваться газообразный азот из ПАС на ранних

стадиях закачки, вызывая некоторую акустическую активность. Возможно, что раскрытие этой естественной трещины было недостаточным для того, чтобы ПАС заполнила ее, и гидроразрыв произошел с некоторым смещением. Однако это всего лишь гипотеза, которая требует подтверждения в дальнейших экспериментах.

Рисунок 98 демонстрирует фотографии нижней части блока, сделанные с четырех сторон. Следует отметить, что фотографии также показывают отклонение созданной поверхности трещины гидроразрыва от ожидаемого горизонтального направления. Возможно, это связано с наличием естественных трещин в исходном гранитном блоке, которые являются локальными концентраторами напряжений, приводящими к некоторому отклонению направления роста трещины гидроразрыва от горизонтального направления.

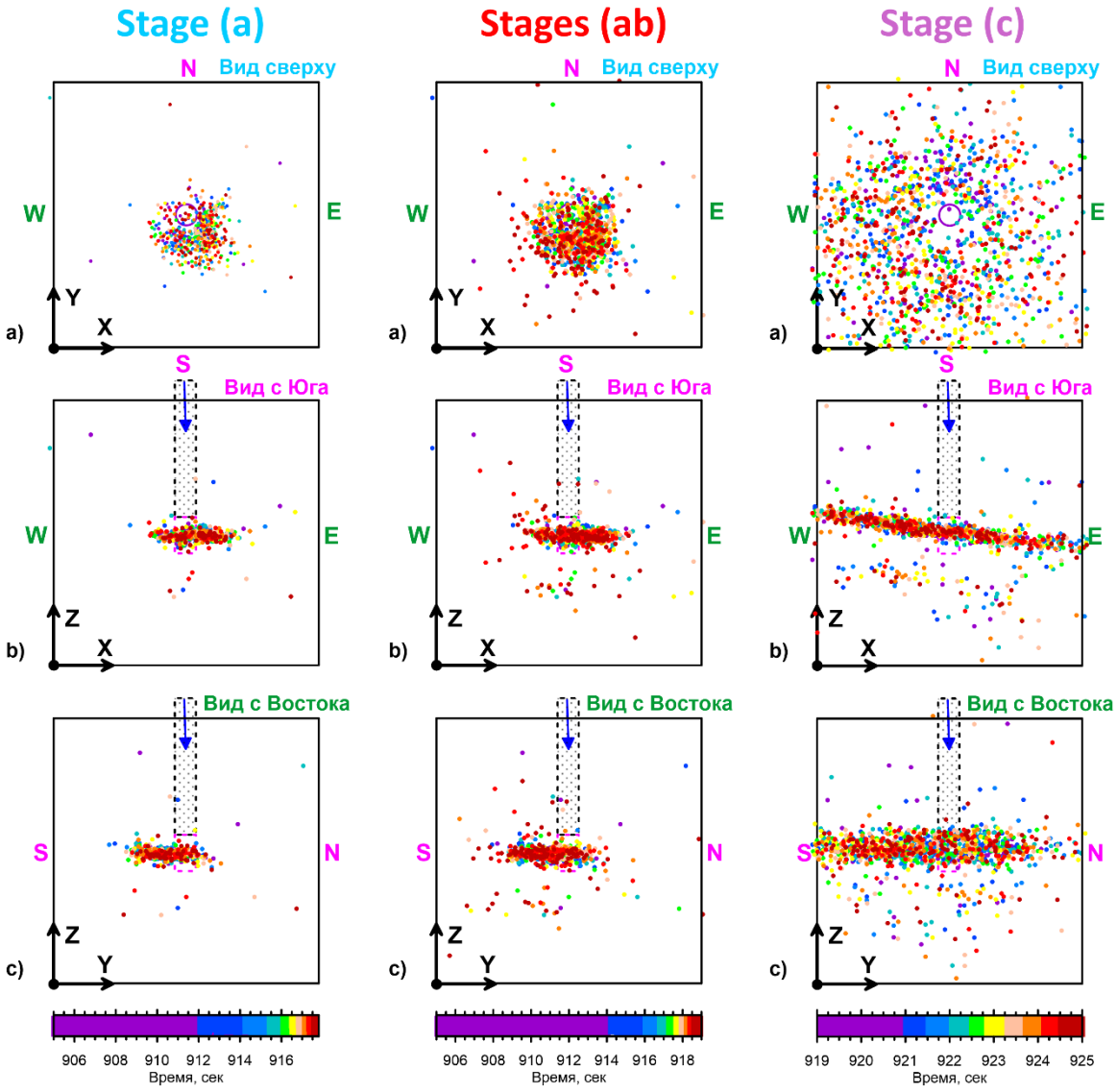


Рисунок 97. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца TGB-04-ПАС для трех стадий развития трещины гидроразрыва: (a), (ab), (c).

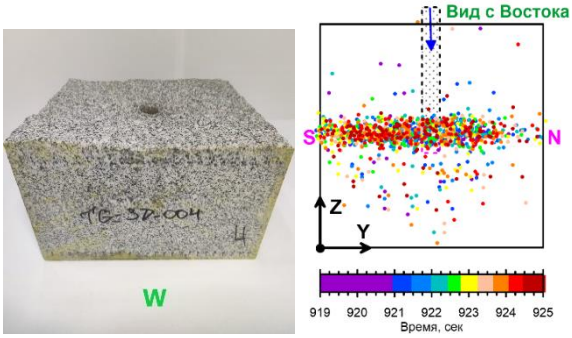


Рисунок 98. Фотография нижней части образца TGB-04-ПАС после эксперимента гидроразрыва и соответствующая ей проекция АЭ.

4.4 Жидкий CO_2 (L-CO_2)

В данном эксперименте была модифицирована система закачивания жидкости путем добавления дополнительного резервуара с жидким CO_2. Рисунок 99 демонстрирует такие параметры гидроразрыва как давление жидкости гидроразрыва (красная кривая), общее число акустических сигналов (фиолетовая кривая), объем жидкости, которая была закачана в гранитный блок (синяя кривая). Анализ данных кривых показывает, что на 540 секунде эксперимента при давлении, равном 14,5 МПа, началась утечка жидкого CO_2 в гранитный блок. Уже на 700 секунде эксперимента скорость утечки CO_2 в гранитный блок составила 3,4 мл/мин.

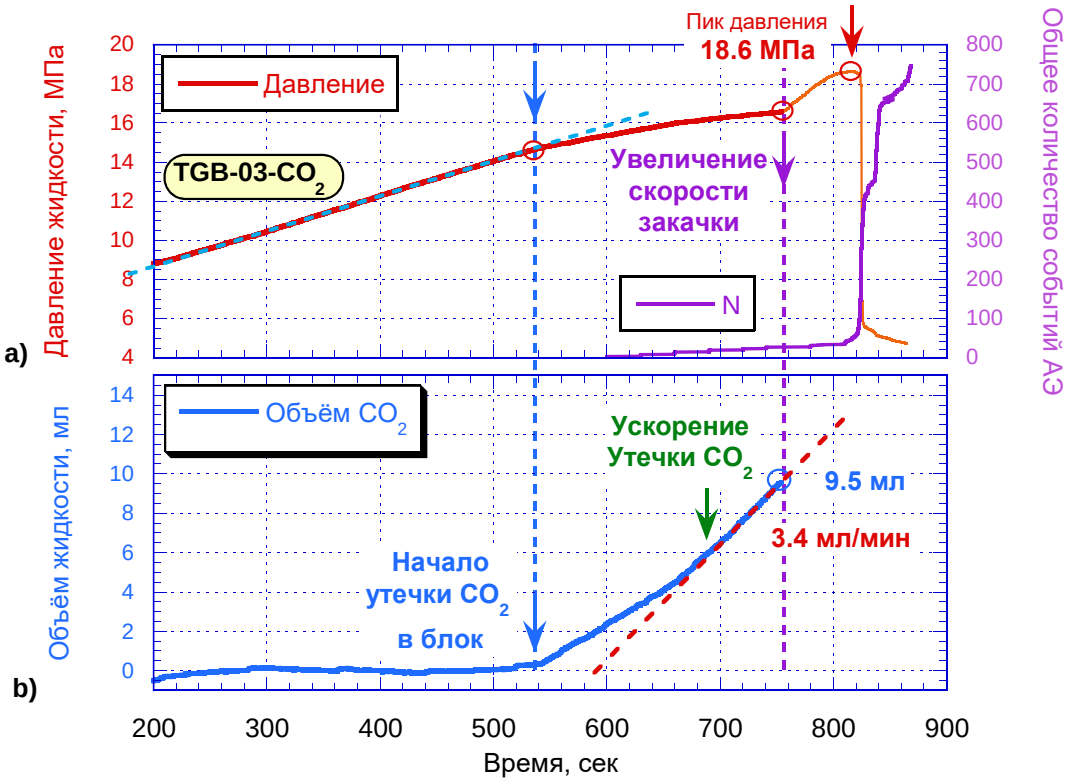


Рисунок 99. Образец TGB-03-CO_2: (a) давление закачанного CO_2 (красный цвет) и общее количество сигналов АЭ (фиолетовый цвет); (b) объем жидкости, утекшей в гранитный блок (голубой цвет).

Акустической активности также не наблюдалось (фиолетовая кривая). Похожая утечка данной маловязкой жидкости гидроразрыва наблюдалась ранее в аналогичном эксперименте. Поэтому, на 760 секунде эксперимента было принято решение увеличить скорость закачки жидкости в полтора раза, с 5 мл/мин до 7,5 мл/мин, то есть до максимально возможной скорости закачки для используемых насосов. Трещина гидроразрыва была успешно создана при увеличенной скорости закачки жидкости.

Рисунок 100 демонстрирует параметры гидроразрыва, зарегистрированные за 40-секундный интервал времени эксперимента. Кривая, описывающая давление (Рисунок 100a, красная кривая), начинает отклоняться от линейного тренда задолго до достижения пика давления (18,6 МПа), что объясняется утечкой L-CO_2. На 821,5 секунде эксперимента наблюдалось постепенное увеличение общего числа акустических событий (Рисунок 100a, фиолетовая кривая). Однако, первичная акустическая активность наблюдалась на более ранних стадиях эксперимента.

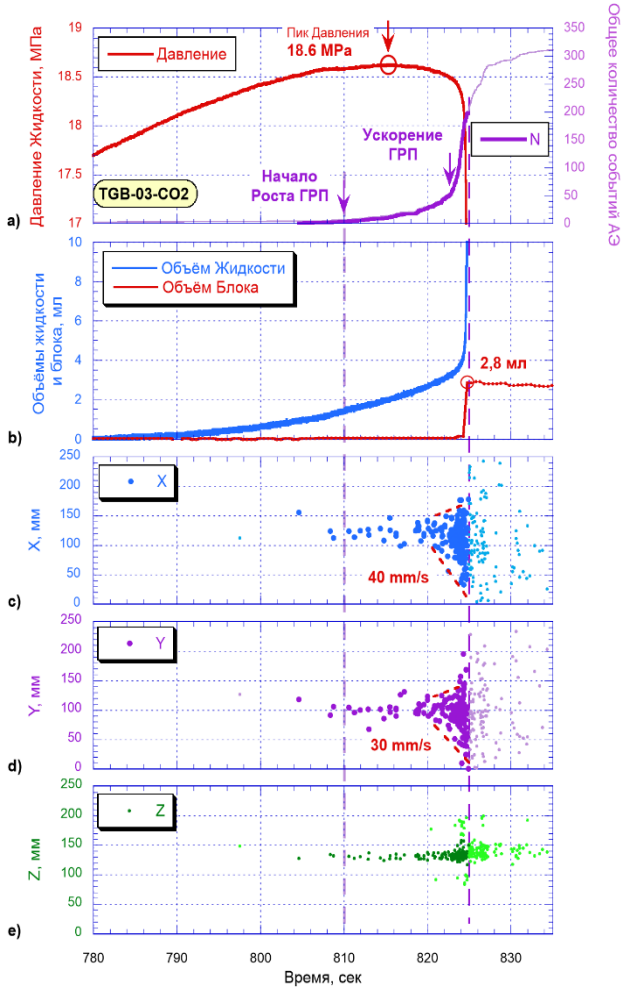


Рисунок 100. Образец TGB-03-CO_2: (a) давление закачанной жидкости гидроразрыва (красный) и общее количество залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) объем жидкости, выдавленной из плоских домкратов (красный), и объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (синий); (c) и (d) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y соответственно; (e) вертикальные координаты

залоцированных сигналов АЭ. Все параметры отображаются в зависимости от времени эксперимента.

Следует отметить, что в данном эксперименте (с закачкой жидкого CO_2) от момента регистрации максимального давления жидкости в скважине до момента достижения трещиной боковой поверхности образца проходит довольно значительный в рамках лабораторных экспериментов интервал времени – 10 секунд. Это объясняется тем, что изначально L-CO_2 проникает в очень узкие каналы, и только когда раскрытие каналов становится достаточным, происходит резкое падение давления в скважине. Утечка L-CO_2 по узким каналам обеспечивает плавное увеличение объема жидкости (Рисунок 100b, синяя кривая), просочившейся в породу и в трещину гидроразрыва

Аналогично эксперименту с закачкой ПАС, в момент достижения трещиной боковой поверхности образца наблюдается довольно резкое увеличение объема CO_2 (Рисунок 100b, синяя кривая), связанное с переходом жидкого CO_2 в газообразное состояние. Данное явление значительно затрудняет точное определение объема жидкости, которая заполняла трещину гидроразрыва в момент, когда трещина достигла боковой поверхности образца. Несмотря на описанные затруднения, оценить объем трещины можно по объему жидкости, выдавленному из плоских домкратов. В данном эксперименте, объем, выдавленный из плоских домкратов, составил 2,8 мл (Рисунок 100b, красная кривая).

Распределения сигналов АЭ по осям X (Рисунок 100c) и Y (Рисунок 100d) демонстрирует, что распространение залоцированных сигналов происходило с некоторым смещением в область меньших значений координат. Это можно соотнести с тем, что источником акустической активности могли послужить как развитие самой трещины гидроразрыва, так и утечка L-CO_2 в гранитный блок. Распределение сигналов АЭ вдоль вертикальной оси Z (Рисунок 100e, зеленые точки) также демонстрирует небольшое смещение на уровне, чуть выше середины блока (Z = 130 мм).

Предположения о возможных причинах такого поведения трещины гидроразрыва во время закачки L-CO_2 можно сделать на основе анализа трех ортогональных проекций распределения сигналов АЭ в пространстве для трех стадий закачки (Рисунок 101). На стадии (a) облако акустических событий смещено в юго-западном направлении от скважины. Это же направление преобладает на стадии (b) до тех пор, пока трещина гидроразрыва не достигнет поверхности блока (Рисунок 101, первое и второе изображение в верхнем ряду). После этого, облако акустических событий также остается локализованным в юго-западной части блока (Рисунок 101, третье изображение в верхнем ряду).

Проекция «вид сбоку», представленная в среднем ряду (Рисунок 101), демонстрирует локализацию событий АЭ ниже созданной трещины на стадиях (a) и (b), однако на стадии (c) положение событий АЭ уже соответствует фактическому положению трещины (Рисунок 101, третья картинка в среднем ряду). Объяснением необычной локализации событий АЭ на стадиях (a) и (b) может быть возможное наличие естественной трещины в блоке TGB-03-CO_2, через которую L-CO_2 начал просачиваться на ранних стадиях закачки, переходя из жидкого в газообразное состояние и вызывая некоторую активность АЭ. Предположительно, раскрытие этой естественной трещины было недостаточным для того, чтобы весь L-CO_2, закачанный в скважину, просочился через нее, что и вызвало смещение трещины гидроразрыва. Однако эта гипотеза требует подтверждения в дальнейших экспериментах.

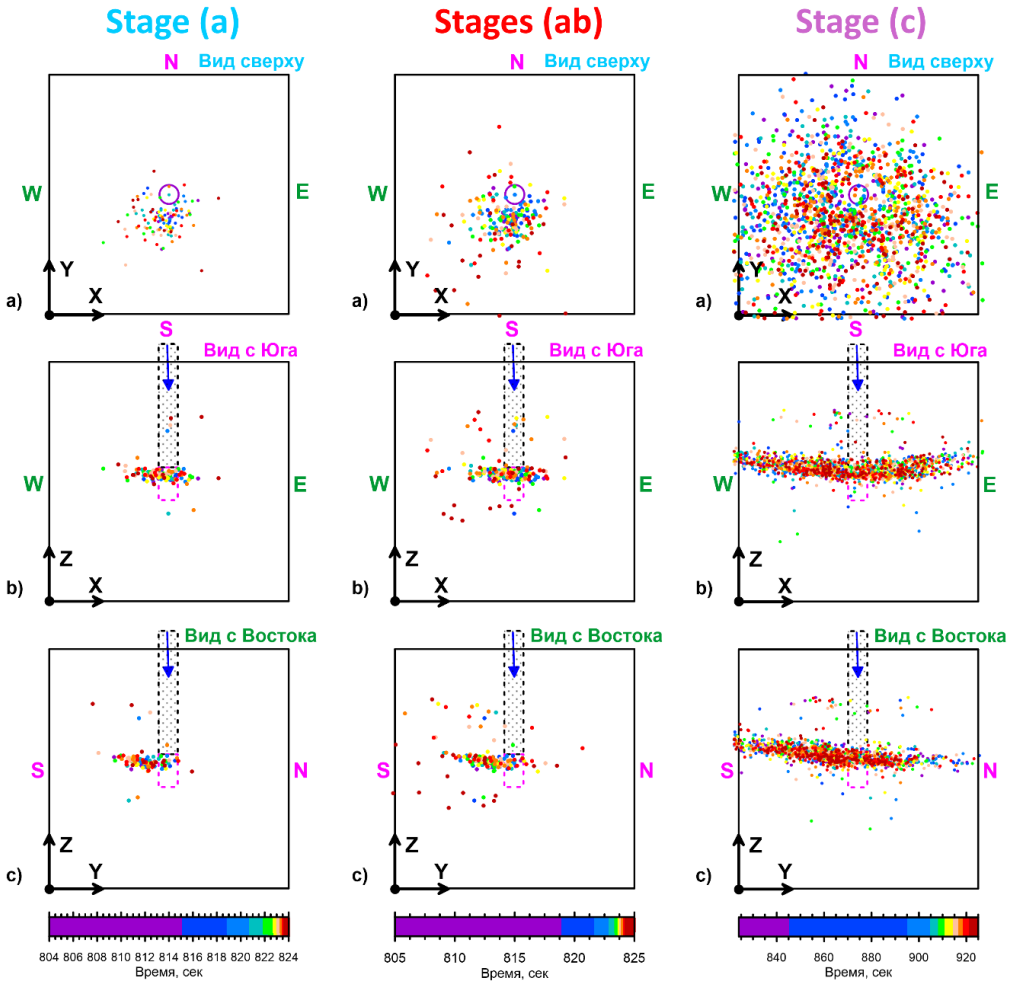


Рисунок 101. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образца TGB-03-CO_2 для трех стадий развития трещины гидроразрыва: (a), (ab), (c).

Фотографии нижней части блока (Рисунок 102), сделанные со всех четырех сторон, показывают отклонение созданной поверхности гидроразрыва от ожидаемого горизонтального направления, так же как и в случае закачки ПАС. Возможно, что это

связано с наличием некоторых естественных трещин в исходном гранитном блоке, которые являются локальными концентраторами напряжений, приводящими к некоторому отклонению направления роста трещины от горизонтального направления.

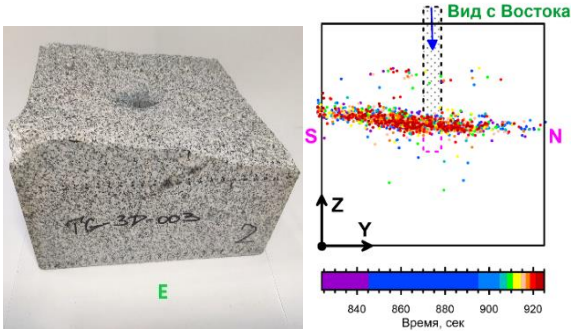


Рисунок 102. Фотография нижней части образца TGB-03-CO_2 после эксперимента гидроразрыва и соответствующая ей проекция АЭ.

4.5 Результаты лабораторных экспериментов

Таблица 26 демонстрирует результаты тестирования четырех гранитных кубов с закачкой четырех жидкостей гидроразрыва: ДС-1, ЛГ, ПАС, L-CO_2.

Таблица 26. Результаты экспериментов гидроразрыва, полученные на кубических образцах Ташмурунского гранита.

№ п.п.	1	2	4	5
№ образца	TGB-01	TGB-05	TGB-04	TGB-03
Жидкость гидроразрыва	ДС-1	ЛГ	ПАС	L-CO_2
σ_1, МПа	12	12	12	12
σ_2, МПа	8	8	8	8
σ_3, МПа	4	4	4	4
Давление гидроразрыва, МПа	23.2	25.9	19.1	18.6
Эффективное давление гидроразрыва (P_{net}), МПа	19.2	21.9	15.1	14.6
Изменение объема блока, мл	0.8	–	4	2.8
Перемещение границы блока, мкм	12.8	–	64	44.8
Объем жидкости в момент выхода трещины на поверхность, мл	1.30	1.06	–	–
Скорость роста трещины (ось X), мм/с	30	100	12	40
Скорость роста трещины (ось Y), мм/с	30	100	12	30
Интервал времени от момента регистрации максимального давления до выхода трещины на боковую поверхность, с	2.5	0.8	4.0	9.0
Скорость закачки жидкости, мл/мин	5	5	5	7.5
Вязкость жидкости при 100 $с^{-1}$, сП	710	17	153	0.13

Чтобы выполнить корректное сопоставление результатов испытаний, выполненных в кубических и цилиндрических образцах, объем жидкости, выдавленной из

плоских домкратов во время раскрытия трещины гидроразрыва, был нормализован к площади грани куба и пересчитан в перемещения грани куба (Таблица 26). В случае закачки ДС-1 перемещение грани куба, вызванное раскрытием трещины гидроразрыва, составляет 12,8 мкм (TGB-01-ДС), в то время как в случае закачки ЛГ этот параметр составляет 4,8 мкм (TGB-05-ЛГ). Эти значения довольно хорошо согласуются с зарегистрированными значениями перемещений поршня пресса при закачивании тех же жидкостей гидроразрыва в цилиндрические образцы, описанные ранее. Следует отметить, что при исследовании цилиндрических образцов значения перемещений поршня 4,0 мкм и 1,1 мкм при закачивании ПАС и L-CO_2 в образцы WG-714 и WG-709 соответственно (Таблица 26). Однако мы измерили значительно большее перемещение граней блоков при закачке тех же жидкостей гидроразрыва в кубические образцы (64 мкм и 44,8 мкм для образцов TGB-04 и TGB-03 соответственно, Таблица 26). Рисунок 103 демонстрирует результаты сравнения раскрытия трещины гидроразрыва при испытании цилиндрических и кубических образцов.

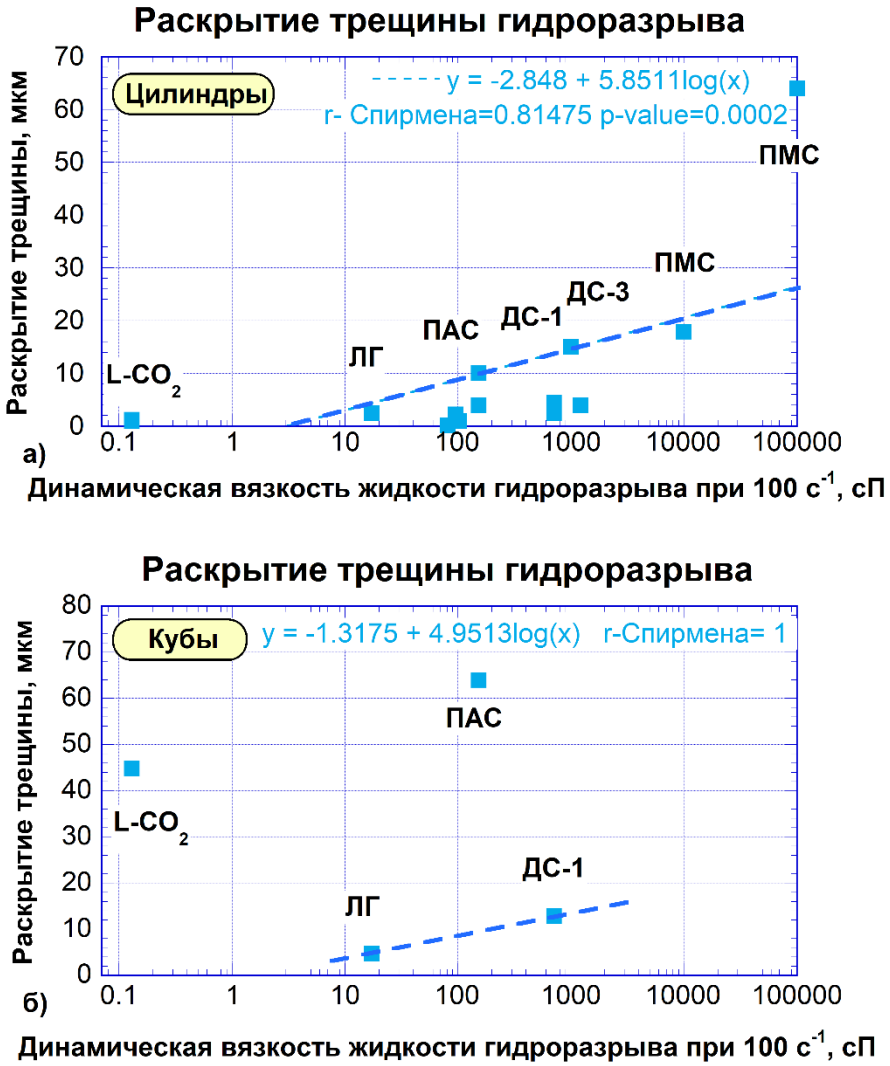


Рисунок 103. Взаимосвязь между раскрытием трещины гидроразрыва и вязкостью закачиваемой жидкости для цилиндрических (а) и кубических (б) образцов.

При сравнении результатов (Рисунок 103), следует иметь в виду, что в псевдо-трехосных условиях жидкости гидроразрыва L-CO_2 и ПАС оставались в жидком состоянии при достижении боковой поверхности образца, в то время как в истинно трехосных условиях L-CO_2 и ПАС переходили в газообразное состояние после достижения трещиной боковой поверхности образца (наблюдался переход к атмосферным условиям) и значительно увеличивали свой объем с высвобождением накопленной энергии.

Рисунок 104 демонстрирует сравнение скоростей роста трещин, полученных в двух системах нагружения (псевдо-трехосных и истинно трехосных условиях). Анализ графиков демонстрирует общую тенденцию уменьшения скорости роста трещин с увеличением вязкости агента, независимо от типа образца и системы загрузки. Следует отметить, что значения скоростей роста трещины в случае закачки ПАС и ДС достаточно хорошо совпадают для цилиндров и кубов.

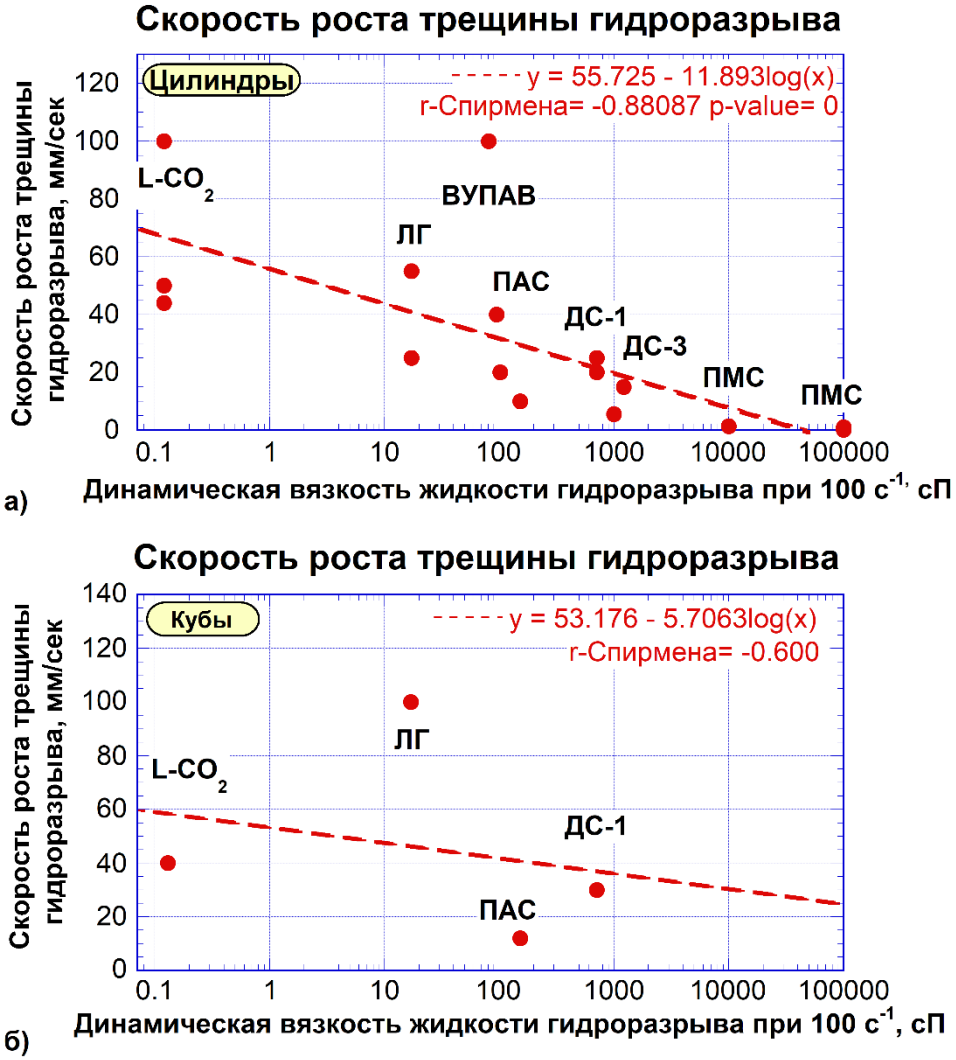


Рисунок 104. Зависимость между вязкостью закачиваемой жидкости и скоростью распространения трещины для цилиндрических (а) и кубических (б) образцов.

Рисунок 105 демонстрирует сравнение значений эффективных давлений гидроразрыва, полученных в экспериментах на цилиндрических и кубических образцах. Следует отметить, что наблюдается общая закономерность увеличения значений эффективного давления гидроразрыва с увеличением вязкости жидкости, инициирующей гидроразрыв. Однако мы обнаружили различия в абсолютных значениях эффективных давлений разрыва пласта для цилиндров и кубов. Это может быть связано как с различием в геометрии образцов, геометрии скважин, так и с наличием надрезов в стволах скважин испытуемых кубов, а также с различием в жесткости систем нагнетания и поддержания давления в двух системах загрузки.

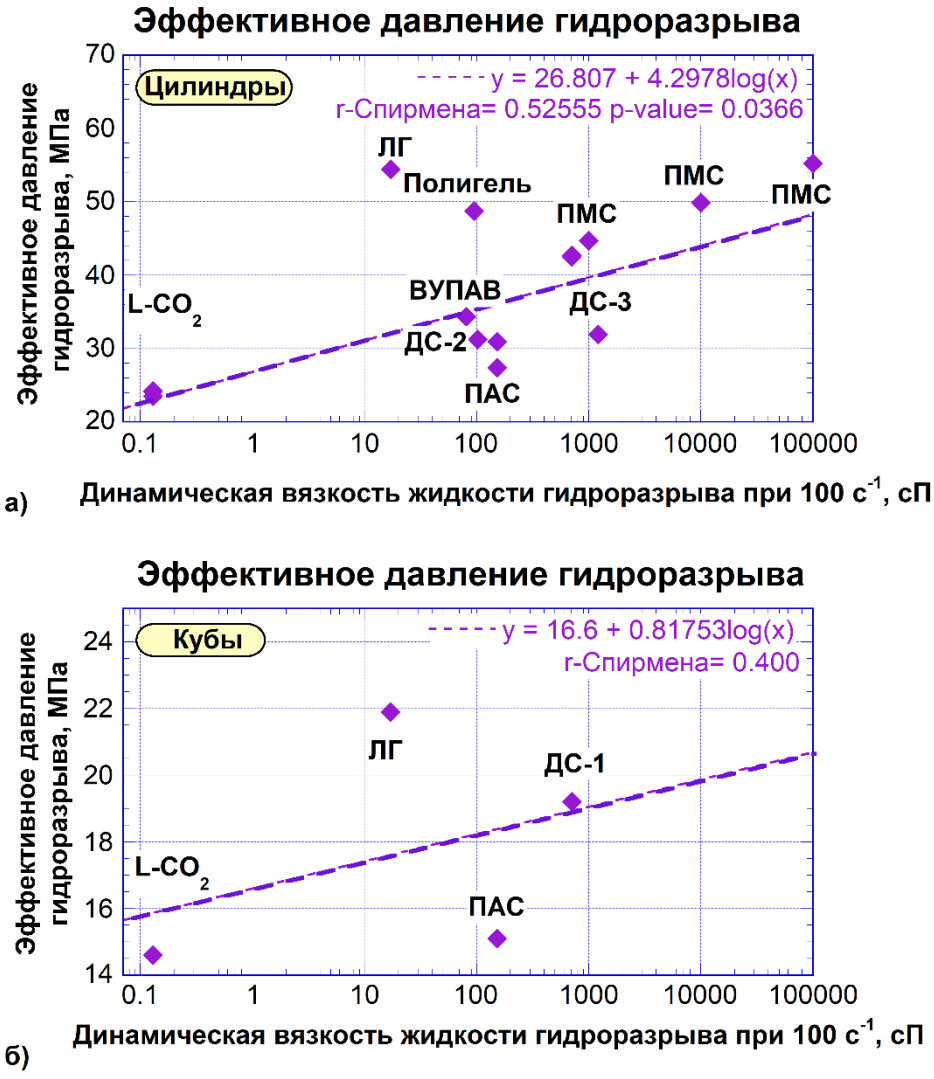


Рисунок 105. Взаимосвязь эффективного давления образования трещины и вязкости закачиваемой жидкости для цилиндрических (а) и кубических (б) образцов.

4.6 Выводы к главе 4

В данной главе были исследованы инициация, распространение и изменение параметров трещины гидроразрыва в кубических образцах, размер грани которых составляет 25 см. Трещина гидроразрыва была инициирована закачкой следующих

жидкостей: жидкий CO_2, ЛГ, ПАС, ДС-1, вязкости которых при 100 $с^{-1}$ изменяются от 0.13 сП до 710 сП.

Кроме того, в данной главе экспериментально были выявлены взаимосвязи между параметрами трещины гидроразрыва и вязкостью инициирующей ее жидкости. Так, в экспериментах с закачкой более вязкой жидкости было зарегистрировано более высокое эффективное давление гидроразрыва. Наименьшее давление гидроразрыва было зафиксировано при испытании с закачкой жидкого CO_2.

К тому же, была выявлена экспериментально 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.

В добавок, была выявлена экспериментально 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 CO_2 и дистиллированной воды.

Также, было показано, что экспериментально полученные взаимосвязи для кубических образцов хорошо согласуются с взаимосвязями, выявленными для цилиндрических образцов.

5. Результаты экспериментов по инициации трещины гидроразрыва в цилиндрических образцах осадочных горных пород

5.1 Сланцы

Данный раздел исследования демонстрирует результаты лабораторных экспериментов по инициации трещины гидроразрыва в шести цилиндрических образцах сланцев артинского яруса диаметром 50 мм. Керн, предоставленный для испытаний ООО «РИТЭК», был отобран из вертикальной скважины в интервале глубин 5700 – 5900 метров. Подготовленные к испытаниям образцы в зависимости от глубины отбора демонстрируют различающиеся прочностные характеристики. Целью данных лабораторных исследований было изучение влияния природных неоднородностей, таких как трещины, включения, слоистость на параметры и динамику распространения трещины гидроразрыва. Для всех испытанных образцов были созданы одинаковые условия нагрузки, моделирующие естественные пластовые условия, и в качестве жидкости гидроразрыва во всех экспериментах использовалось безводное минеральное масло Multitherm PG-1, которое закачивалось с постоянной скоростью 5 мл/мин.

5.1.1 Минеральное масло (Multitherm PG-1)

Рисунок 106 демонстрирует зарегистрированные во время эксперимента параметры гидроразрыва: давление жидкости в стволе скважины, общее количество событий АЭ, производную от давления жидкости, изменение длины цепного датчика, которое непосредственно связано с раскрытием трещины, объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва, амплитуду сигналов АЭ и вертикальные координаты локализованных сигналов в зависимости от времени закачки для образцов сланцев ARE-2R6 (левая колонка) и ARE-4R4 (правая колонка). Для удобства сравнения и анализа все параметры на графиках показаны в четырехсекундном интервале времени. Рисунок 106 демонстрирует увеличение активности акустической эмиссии в образцах ARE-2R6 и ARE-4R4, которое возникло до регистрации максимального давления жидкости в скважине. Момент увеличения активности АЭ также можно рассматривать как начало зарождения трещины гидроразрыва (голубая вертикальная пунктирная линия). Однако временно́й интервал от зарождения трещины до максимального давления жидкости в стволе скважины (красная вертикальная пунктирная линия) составляет всего долю секунды (Рисунок 106a,e).

Анализ производной давления жидкости в стволе скважины (Рисунок 106b,g) показывает, что скорость изменения давления жидкости достигает минимального значения в момент времени, обозначенный оранжевой вертикальной пунктирной линией (Рисунок 106). Этот момент времени также оказался довольно близким к моменту регистрации наибольшей амплитуды АЭ (Рисунок 106d,i) и моменту, когда трещина достигает верхнего

торца образца (Рисунок 106e,j). Комбинация этих трех независимо зарегистрированных параметров позволяет предположить, что момент, когда производная давления достигает своего минимального значения, совпадает с моментом, когда трещина выходит к цилиндрической поверхности образца, что приводит к наибольшей скорости падения давления жидкости в стволе скважины и утечке жидкости из образца.

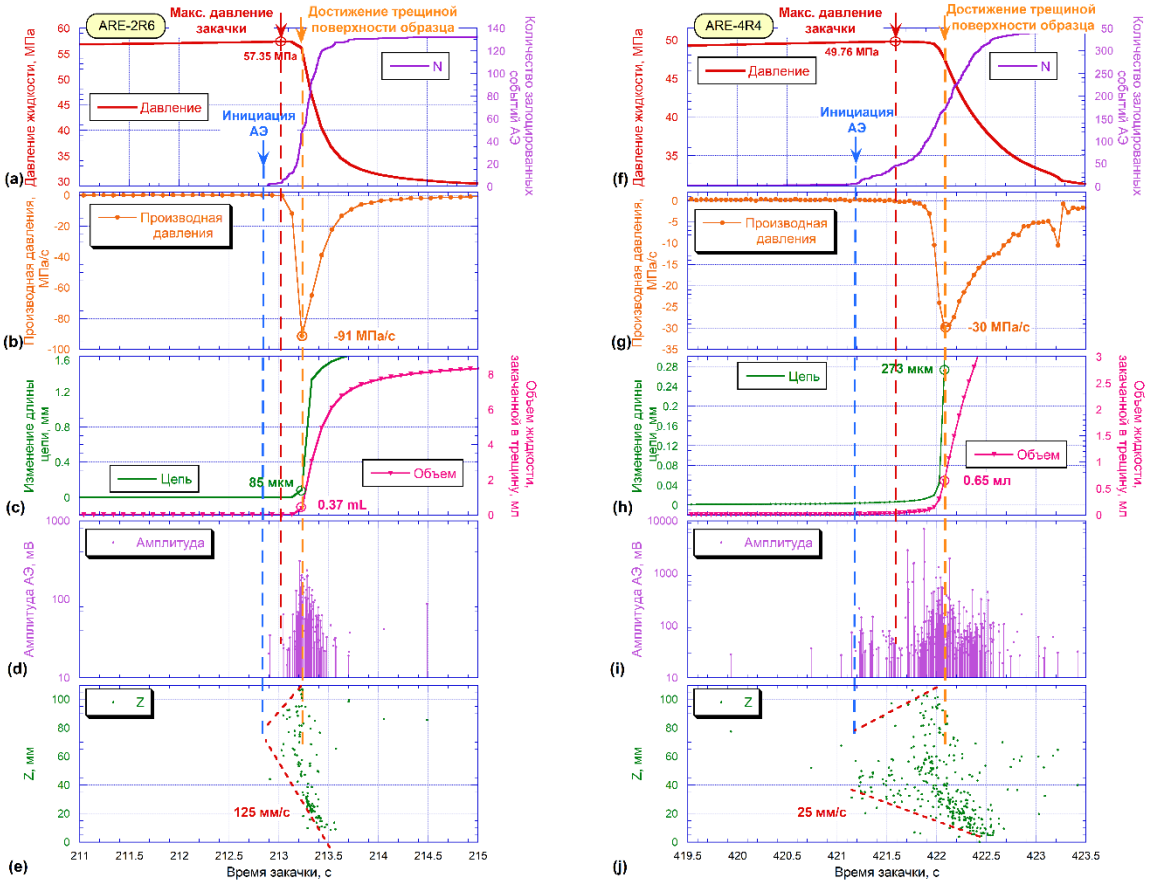


Рисунок 106. Графики геомеханических и акустических характеристик для образцов ARE-2R6 (левая колонка) и ARE-4R4(правая колонка). (a), (f) давление закачанной жидкости (красный цвет) и общее число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (g) скорость изменения давления в скважине; (c), (h) изменение длины цепного датчика поперечной деформации образца (зелёный) и объёма жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (малиновый); (d), (i) амплитуда сигналов АЭ; (e), (j) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ. Все параметры построены от времени тестирования образцов.

Следует подчеркнуть, что основное различие в параметрах трещин, инициированных в двух представленных образцах, заключается в значениях скорости распространения трещины, которая составляет 125 мм/с в образце ARE-2R6 (Рисунок 106e) и 25 мм/с в образце ARE-4R4 (Рисунок 106j). Важно отметить, что условия нагружения образцов, вязкость жидкости и скорость закачки в этих экспериментах были одинаковыми. Одним из объяснений наблюдаемого различия в динамике распространения трещины гидроразрыва является различия состава и структуры испытанных образцов, отобранных с разных глубин.

Рисунок 107 демонстрирует изменение параметров трещины гидроразрыва, зарегистрированных в образцах ARE-3R1 (левая колонка) и ARE-8R1 (правая колонка). В образце ARE-3R1 трещина зародилась (голубая вертикальная пунктирная линия в левой колонке графиков) за доли секунды до регистрации максимального давления жидкости в стволе скважины (красная вертикальная пунктирная линия в левой колонке графиков). В образце ARE-8R1 зарождение трещины и регистрация максимального давления жидкости произошли почти одновременно (правый столбец графиков). Оранжевая вертикальная пунктирная линия указывает на момент, когда трещина гидроразрыва достигла верхнего торца образца (Рисунок 107e,j).

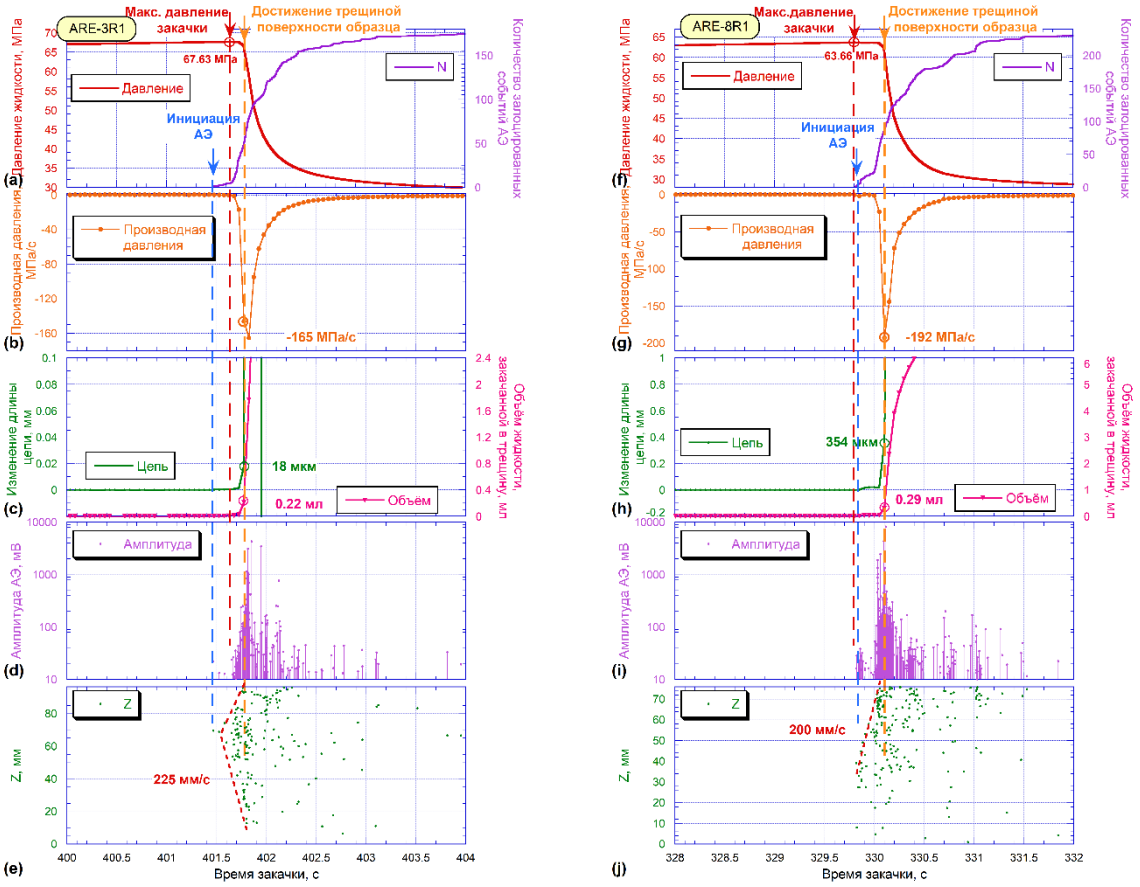


Рисунок 107. Графики геомеханических и акустических характеристик для образцов ARE-3R1 (левая колонка) и ARE-8R1 (правая колонка). (a), (f) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (g) скорость изменения давления в скважине; (c), (h) изменение длины цепного датчика поперечной деформации образца (зелёный) и объёма жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (малиновый); (d), (i) амплитуда сигналов АЭ; (e), (j) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ. Все параметры построены от времени тестирования образцов.

Как и в случае с предыдущей парой образцов (ARE-2R6 и ARE-4R4), момент достижения трещиной цилиндрической поверхности образца: (1) соответствует началу экспоненциального падения давления жидкости в стволе скважины (Рисунок 107a,e); (2) соответствует регистрации максимальной амплитуды сигналов АЭ (Рисунок 107d,i); (3)

соответствует моменту регистрации минимального значения производной давления жидкости в стволе скважины (Рисунок 107b,g). В образце ARE-3R1 распространение трещины гидроразрыва было симметричным в двух направлениях (Рисунок 107e). Тогда как, в образце ARE-8R1 трещина гидроразрыва распространялась, в основном, в одном направлении, от ствола скважины к верхнему торцу образца (Рисунок 107j). Важно подчеркнуть, что длина образца ARE-8R1, равная 75,76 мм, позволила просверлить отверстие на высоте 38,50 мм от нижнего торца, или почти посередине образца. Рисунок 108 демонстрирует набор параметров трещины гидроразрыва для испытанных образцов ARE-1R1 (левая колонка) и ARE-1R2 (правая колонка), аналогично предыдущим экспериментам (Рисунок 106, Рисунок 107).

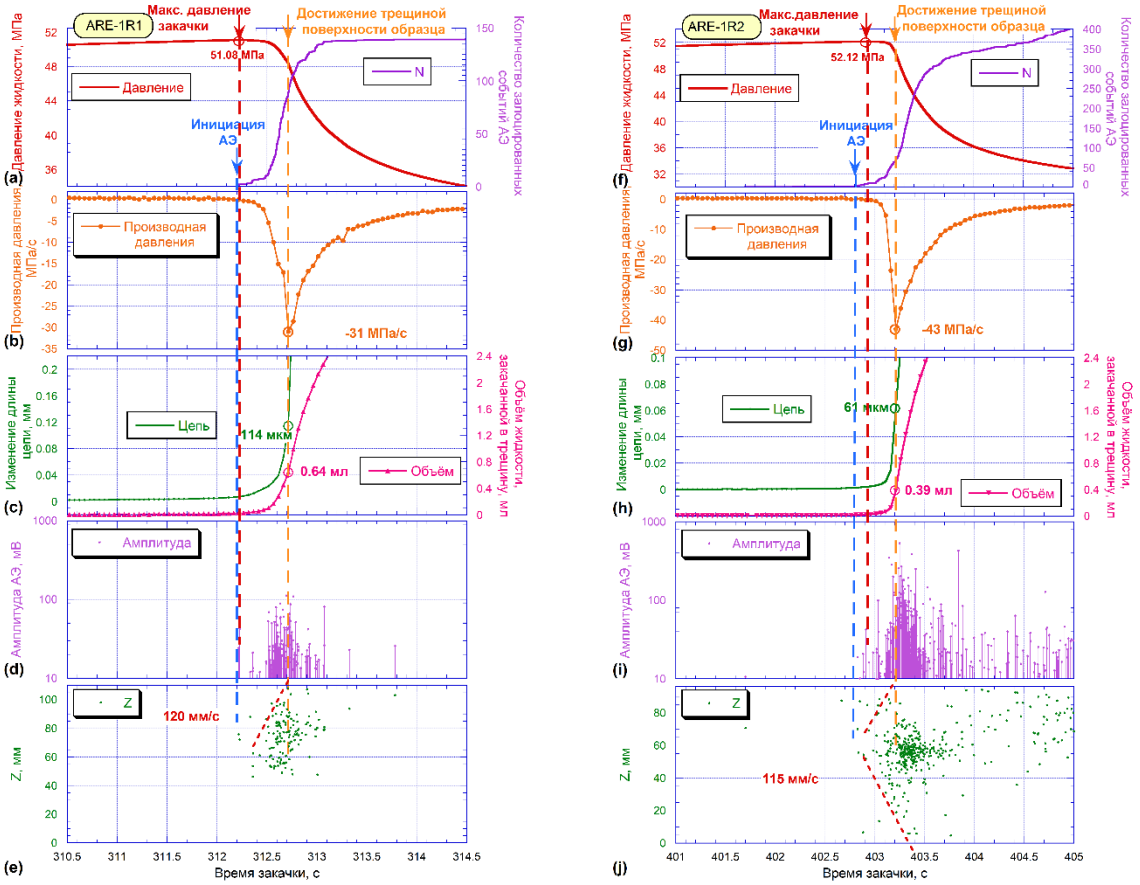


Рисунок 108. Графики геомеханических и акустических характеристик для образцов ARE-1R1 (левая колонка) и ARE-1R2 (правая колонка). (a), (f) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b), (g) скорость изменения давления в скважине; (c), (h) изменение длины цепного датчика поперечной деформации образца (зелёный) и объёма жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (малиновый); (d), (i) амплитуда сигналов АЭ; (e), (j) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ. Все параметры построены от времени тестирования образцов.

Как и в образце ARE-8R1, момент зарождения трещины гидроразрыва в образце ARE-1R1 был определен по увеличению активности АЭ (голубая вертикальная пунктирная линия) и почти совпал с регистрацией максимального давления жидкости в стволе

скважины (красная вертикальная пунктирная линия). Также, как и в образце ARE-8R1, трещина гидроразрыва в образце ARE-1R1 распространялась только в одном направлении (в верхней части образца) – от ствола скважины к верхнему торцу образца. В то время как, в образце ARE-1R2 распространение трещины гидроразрыва было симметричным в двух направлениях, идентично распространению трещины гидроразрыва в трех описанных ранее образцах сланцев (ARE-2R6, ARE-4R4 (Рисунок 106) и ARE-3R1 (Рисунок 107)).

Наиболее вероятным объяснением наблюдаемых в экспериментах различий в параметрах трещины гидроразрыва является различия в составе и структуре исследованных образцов. Моменты времени, когда трещина гидроразрыва достигала верхнего торца образцов ARE-1R1 и ARE-1R2, совпадали с моментами регистрации наибольших амплитуд сигналов АЭ (Рисунок 108d,i) и моментами регистрации наименьших значений производной давления жидкости в стволе скважины (Рисунок 108b,g). Следовательно, момент времени, обозначенный оранжевой вертикальной пунктирной линией, является началом утечки жидкости из образца через образовавшуюся трещину гидроразрыва, достигшую поверхности образца.

Таблица 27 демонстрирует основные результаты лабораторных экспериментов по инициации трещины гидроразрыва в цилиндрических образцах сланцев.

Таблица 27. Основные результаты экспериментов гидроразрыва в цилиндрических образцах сланцев.

№ образца	**ARE-1R1**	**ARE-1R2**	**ARE-2R6**	**ARE-3R1**	**ARE-4R4**	**ARE-8R1**
Предел прочности при одноосном растяжении (Бразильский тест), МПа	7.65	7.65	10.20	18.55	8.60	10.40
Давление гидроразрыва, МПа	51.08	52.12	57.35	67.63	49.76	63.66
Изменение длины цепи в момент, когда трещина достигла поверхности образца, мкм	114	61	85	18	273	354
Объем жидкости в трещине, мл	0.64	0.39	0.37	0.22	0.65	0.29
Скорость распространения трещины гидроразрыва, мм/с	120	115	125	225	25	200
Скорость закачки жидкости, мл/мин	5	5	5	5	5	5

Скорость падения давления в стволе скважины, МПа/с	-31	-43	-91	-165	-30	-192
Вязкость жидкости, сП	46	46	46	46	46	46
Вертикальная Z координата скважины, мм	73.5	55.0	71.0	60.0	70.0	38.5
σ_1, МПа	54.80	54.80	54.80	54.80	54.80	54.80
σ_3, МПа	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38	27.38

Рисунок 109 демонстрирует взаимосвязь между изменением длины цепного датчика, которое в данных экспериментах отражает степень раскрытия трещины гидроразрыва, и объемом жидкости, закачанной в трещину. Значения этих двух параметров были зарегистрированы в момент, когда трещина гидроразрыва достигала цилиндрической поверхности образца. Согласно результатам экспериментов, в образцах ARE-4R4 и ARE-8R1 (Рисунок 109a, зеленые треугольники) были зафиксированы бóльшие значения изменения длины цепи, чем в остальных образцах. Наблюдаемая линейная взаимосвязь (Рисунок 109a, красная линия) демонстрирует, что увеличение объема поступившей в трещину жидкости приводит к большему раскрытию трещины гидроразрыва.

Зависимость между значениями давления гидроразрыва и объема жидкости, закачанной в трещину, показывает ниспадающий линейный тренд для всех протестированных образцов сланцев (Рисунок 109b). Образец ARE-1R2 имел наибольшее отклонение от выявленного тренда (Рисунок 109b, синий квадрат). График зависимости скорости распространения трещины от объема жидкости, закачанной в трещину, также демонстрирует ниспадающий линейный тренд (Рисунок 109c, красная линия), за исключением ARE-1R1 (Рисунок 109c, красный круг). Определенные отклонения от наблюдаемых линейных взаимосвязей обусловлены различием прочностных свойств исследуемых образцов.

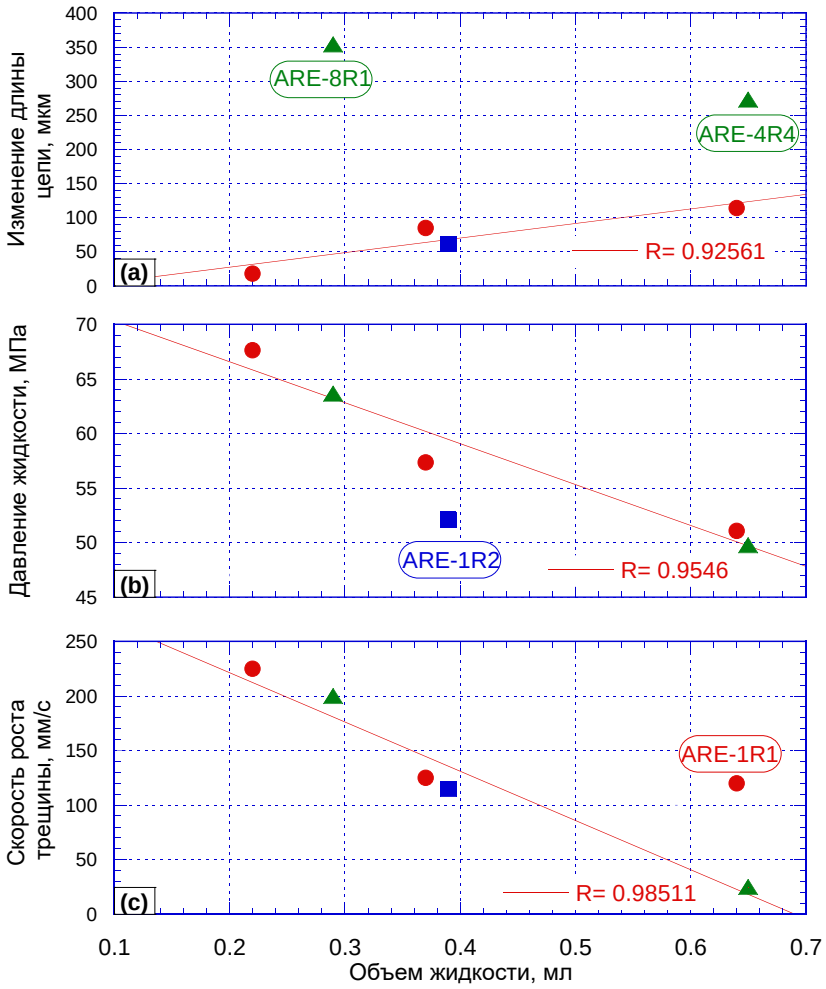


Рисунок 109. Изменения длины цепи (a), давления разрушения (b) и скорости распространения трещины (c) в зависимости от объемов жидкости, поступившей в трещину, измеренные в моменты достижения трещиной цилиндрической поверхности образца.

Рисунок 110 демонстрирует взаимосвязь между значениями изменения длины цепного датчика и давления гидроразрыва. Данная зависимость (Рисунок 110a) имеет ниспадающий линейный тренд и демонстрирует уменьшение раскрытия трещины по мере увеличения давления гидроразрыва. Тем не менее, два образца, ARE-4R4 и ARE-8R1, отклоняются от выявленного тренда (Рисунок 110a, зеленые треугольники), что может быть связано с неоднородностью структуры и состава этих образцов. Рисунок 110b демонстрирует почти линейную зависимость между скоростью распространения трещины и давлением гидроразрыва. Два образца значительно отклоняются от этого линейного тренда (ARE-1R1 и ARE-1R2, Рисунок 110b, красный круг и синий квадрат соответственно).

Кроме того, для каждого исследованного образца предварительно был определен предел прочности при одноосном растяжении непрямым методом (Бразильский тест) и выявлена взаимосвязь между независимо зарегистрированными значениями предела прочности на растяжение и давления гидроразрыва. Показанная линейная взаимосвязь

(Рисунок 110) демонстрирует хорошую связь геомеханических параметров (предела прочности на растяжение) и параметров гидроразрыва (давления гидроразрыва).

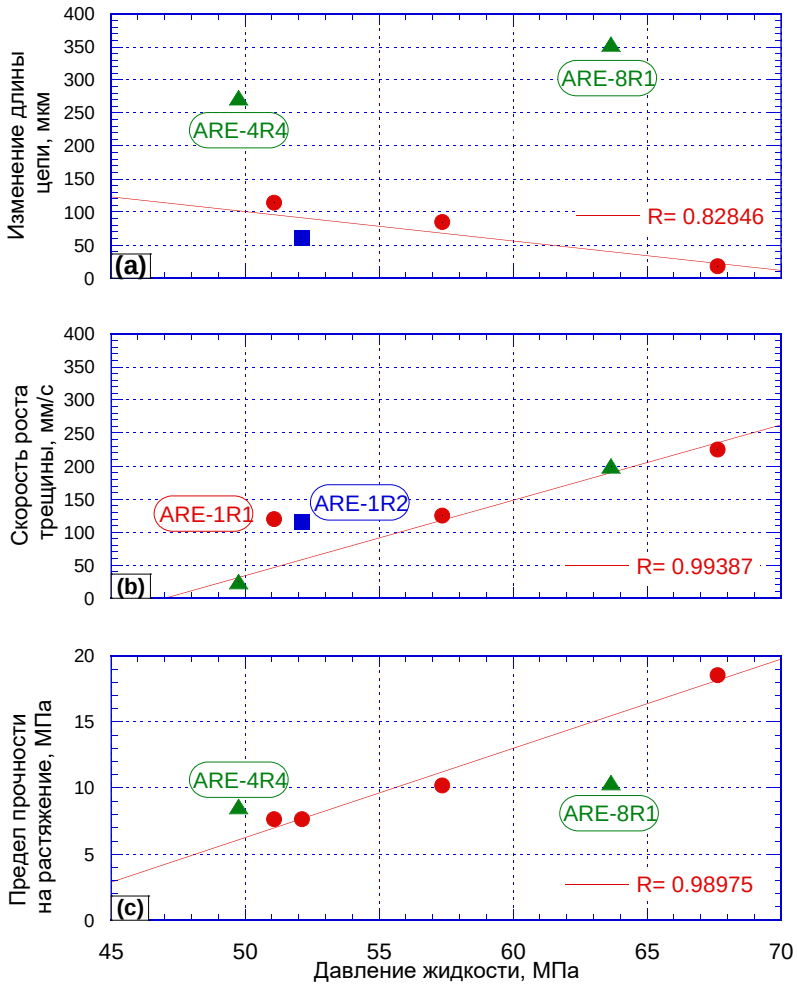


Рисунок 110. Изменения длины цепи (a); скорости распространения трещины (b) и предела прочности на растяжение (Бразильский тест) (c) в зависимости от давления жидкости гидроразрыва.

5.1.2 Анализ снимков рентгеновской компьютерной томографии цилиндрических образцов сланцев после испытаний

Рисунок 111 демонстрирует вертикальные проекции (срезы) рентгеновских снимков компьютерной томографии испытанных образцов сланцев. Во всех изучаемых образцах трещина гидроразрыва распространялась вдоль вертикальной оси образца. Незначительные отклонения трещины от исключительно вертикальной траектории связаны с наличием дополнительных концентраторов напряжений (природных трещин, включений). Рентгеновский снимок образца ARE-1R1 (Рисунок 111) отчетливо показывает, что трещина гидроразрыва распространялась преимущественно в верхней части образца и была остановлена естественной горизонтальной трещиной, расположенной в средней части образца. Данная траектория распространения трещины гидроразрыва в образце ARE-1R1 полностью соответствует результатам локализации АЭ (Рисунок 107e).

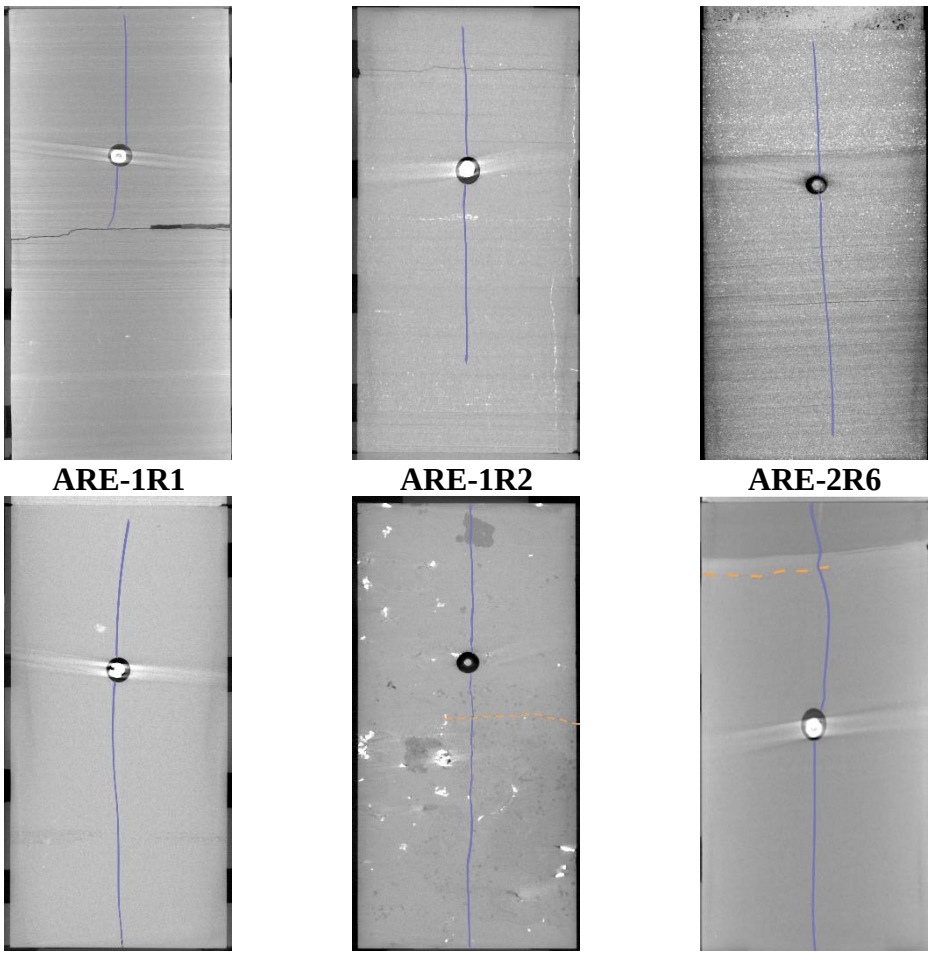


Рисунок 111. Результаты рентгеновской компьютерной томографии (вертикальная проекция) образцов после испытаний на гидроразрыв пласта при боковом давлении 27,4 МПа.

В образце ARE-4R4 можно заметить наличие множества мелких белых включений, которые имеют очень высокую плотность, и два крупных темных включения (малой плотности) с неровными острыми краями (Рисунок 111). По литологическому описанию можно предположить, что данный образец является детрито-обломочным. Отметим наличие субгоризонтальной трещины, расположенной почти в центре образца (оранжевая пунктирная линия). По-видимому, крупные и угловатые включения являются потенциальными концентраторами напряжений, вызывающими замедление распространения трещины гидроразрыва вблизи включений, что существенно изменяет динамику ее распространения.

В верхней части образца ARE-8R1 имеется значительная прослойка, предположительно содержащая органический материал. Толщина прослойки оценивается в 1/6 длины образца (примерно 12,6 мм). Можно предположить, что она влияет на геометрию гидроразрыва. Под прослойкой имеется субгоризонтальная природная трещина (оранжевая пунктирная линия).

5.1.3 Выводы к разделу 5.1

В данном исследовании использовалась разработанная в лаборатории центра добычи углеводородов Сколтеха методика проведения гидроразрыва образцов горных пород в условиях псевдо-трехосного нагружения, воссоздающих естественное напряженное состояние пласта. Динамика распространения трещины гидроразрыва контролировалась с помощью комбинации трех независимых систем наблюдения. АЭ позволила определить моменты зарождения и начала роста трещины гидроразрыва, а также момент достижения ею цилиндрической поверхности и скорость распространения. Цепной датчик радиальной деформации, установленной в центральной части образца, позволил оценить раскрытие инициированной трещины гидроразрыва. Кроме того, из всего объема закачанной в образец жидкости гидроразрыва был рассчитан объем, непосредственно заполнивший трещину гидроразрыва. Лабораторные эксперименты гидроразрыва показали, что сочетание результатов этих трех независимых систем измерений позволяет отслеживать динамику распространения и параметры трещины гидроразрыва, которые практически невозможно измерить непосредственно в полевых условиях.

Основными задачами данной части исследования были: (a) изучение взаимосвязи между параметрами трещины гидроразрыва и геомеханическими характеристиками породы и (b) изучение влияния структуры горной породы на динамику распространения трещины. Было установлено, что инициация трещины гидроразрыва при закачке маловязкой жидкости наблюдалось во всех сланцевых образцах либо за доли секунды до гидроразрыва (момент регистрации максимального давления в стволе скважины), либо одновременно с ним. Результаты данного исследования полностью согласуются с данными, опубликованными ранее в работах [Stanchits и др., 2014; Zhu и др., 2017].

Было установлено, что предел прочности образца при одноосном растяжении (Бразильский тест) и скорость роста трещины гидроразрыва линейно коррелируют с давлением гидроразрыва. Однако в образцах ARE-3R1, ARE-4R4 и ARE-8R1 наблюдалось некоторое отклонение от общей линейной тенденции, что объясняется влиянием структуры образца, наличием естественных трещин и структурных включений в образцах. Было установлено, что направление раскрытия трещины гидроразрыва, определенное по данным акустической эмиссии, хорошо согласуется с ориентацией макроскопической трещины, непосредственно определенной после испытаний с помощью рентгеновской компьютерной томографии. Таким образом, результаты, полученные в ходе серии лабораторных испытаний на сланцевых образцах, могут быть использованы для верификации моделей роста трещины гидроразрыва и интерпретации данных, полученных в полевых условиях.

5.2 Песчаник

5.2.1 Силиконовое масло (жидкость полиметилсилоксановая (ПМС)) ПМС-10 000 и ПМС 100 000

Данная часть исследования посвящена анализу результатов лабораторных экспериментов по инициации трещины гидроразрыва в сухих и насыщенных минеральным маслом Multitherm PG-1 образцах песчаника с целью изучения влияния состояния насыщенности горной породы и вязкости жидкости гидроразрыва на параметры и динамику трещины гидроразрыва. Испытания гидроразрыва были проведены с использованием трех независимых систем датчиков для регистрации деформации образца, непосредственно связанной с раскрытием трещины гидроразрыва, а также давления и объема жидкости гидроразрыва и активности акустической эмиссии (АЭ). Образцы GM4-101, GM5-101 и GM7-101 предварительно были насыщены минеральным маслом Multitherm PG-1. Насыщение образцов обосновано тем, что в естественных условиях большинство пород в коллекторе насыщены пластовым флюидом.

В образец GM5-101 в качестве жидкости гидроразрыва закачивалось силиконовое масло ПМС-10 000; в образец GM7-101 также закачивалось силиконовое масло, но вязкость которого была в 10 раз больше – ПМС-100 000, чем в предыдущем образце. Скорость закачки жидкости гидроразрыва в образцы песчаника была постоянной и составила 5мл/мин.

В образце GM5-101 на 185,5 секунде эксперимента наблюдается возникновение акустической активности (Рисунок 112a, фиолетовая вертикальная пунктирная линия), связанное с зарождением трещины гидроразрыва, которое произошло на 0,50 секунды раньше регистрации максимального давления жидкости в скважине, равного 49,8 МПа (Рисунок 112a, красная кривая). В отличие от теста GM5-101, закачка более вязкой жидкости гидроразрыва (ПМС-100 000 сП) в образец GM7-101 привела к бóльшему значению максимального давления жидкости в скважине (Рисунок 112, красная), которое равно 53,1 МПа, а возникновение сигналов акустической эмиссии (АЭ) (Рисунок 112, фиолетовая) происходит примерно за секунду до регистрации максимального значения давления. Деформации, измеренные в образцах GM5-101 и GM7-101 (Ext_A, Ext_B и значение перемещения поршня, Рисунок 112b), указывают на то, что раскрытие трещины произошло примерно в то же время, что и увеличение активности АЭ (Рисунок 112a). Стоит подчеркнуть, что все три деформации образца были измерены независимо, и их значения отличаются в пределах 10%. Такое близкое соответствие экспериментально измеренных значений позволяет сделать вывод о том, что, прежде всего, деформация образца напрямую связана с раскрытием гидроразрыва, что также вызывает инициацию АЭ. Во-вторых,

близкое совпадение деформаций, измеренных на противоположных сторонах образцов (Ext_A и Ext_B), может указывать на симметричное раскрытие созданной трещины гидроразрыва.

Рисунок 112c демонстрирует объем жидкости, поступившей в трещину. Важно отметить, что начало увеличения объема жидкости (Рисунок 112c) очень точно соответствует независимо измеренному началу деформаций (Рисунок 112b) и увеличению общего числа событий АЭ (Рисунок 112a, фиолетовая кривая).

Представленные далее четыре графика (Рисунок 112d-h) демонстрируют параметры АЭ, зарегистрированные во время эксперимента. Амплитуда каждого зарегистрированного сигнала АЭ в дБ представлена точкой (Рисунок 112d), а синяя линия (Рисунок 112d) показывает амплитуды, сглаженные в скользящем окне из 25 сигналов. Увеличение амплитуды сигналов АЭ можно наблюдать сразу после инициации трещины гидроразрыва, что можно объяснить увеличением микротрещин. Рисунок 112e-f демонстрирует положение акустических событий в горизонтальных плоскостях X и Y, а Рисунок 112g – в вертикальной плоскости Z. Можно отметить очень симметричное распространение сигналов вдоль горизонтальных осей координат X и Y (Рисунок 112e-f), в то время как вдоль вертикальной оси Z большинство событий АЭ локализовано в пределах зоны толщиной около 20 мм (Рисунок 112g).

Инициированная трещина гидроразрыва, согласно анализу зарегистрированных сигналов АЭ, распространяется к границе образца со скоростью приблизительно 3 мм/сек и 15 мм/сек в образцах GM5-101 и GM7-101 соответственно (Рисунок 112h, верхняя синяя пунктирная линия). Такая значительная разница в скоростях распространения трещин была вызвана десятикратной разницей в значениях вязкости закачиваемых силиконовых масел.

Обратим внимание, что события АЭ распространяются в области шириной приблизительно 20 мм (Рисунок 112h, розовые точки, заключенные между синими пунктирными линиями), индуцированной зоной предразрушения (Fracture Process Zone). Положение границы образца обозначено красной горизонтальной пунктирной линией (Рисунок 112h). Фронт зоны предразрушения трещины гидроразрыва достиг границы образца приблизительно за 188,4 секунды и 209,0 секунды эксперимента в образцах GM5-101 и GM7-101 соответственно, что обозначено синей вертикальной пунктирной линией (Рисунок 112h). Обратим внимание, что этот момент соответствует максимальному значению амплитуды АЭ (Рисунок 112d).

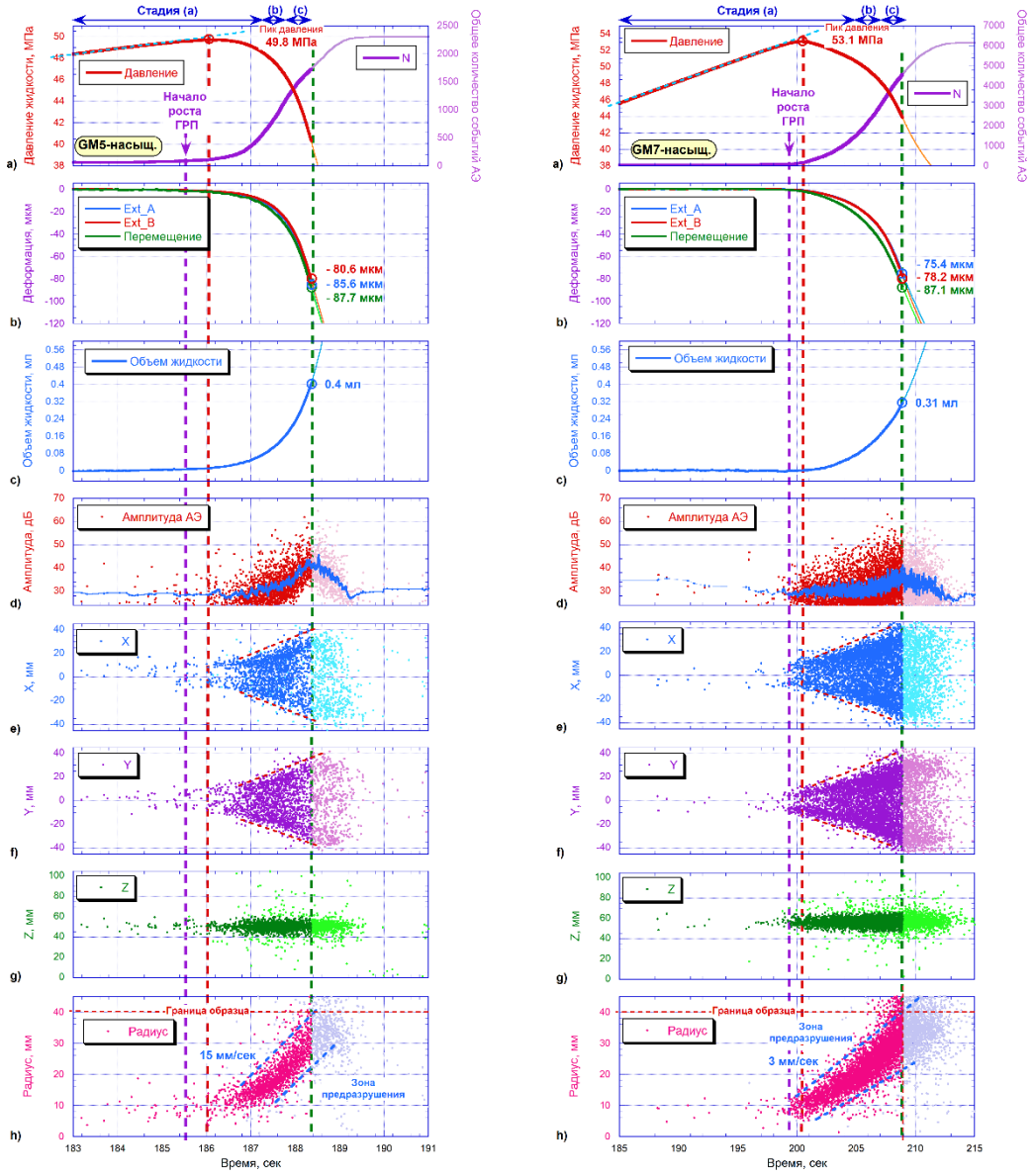
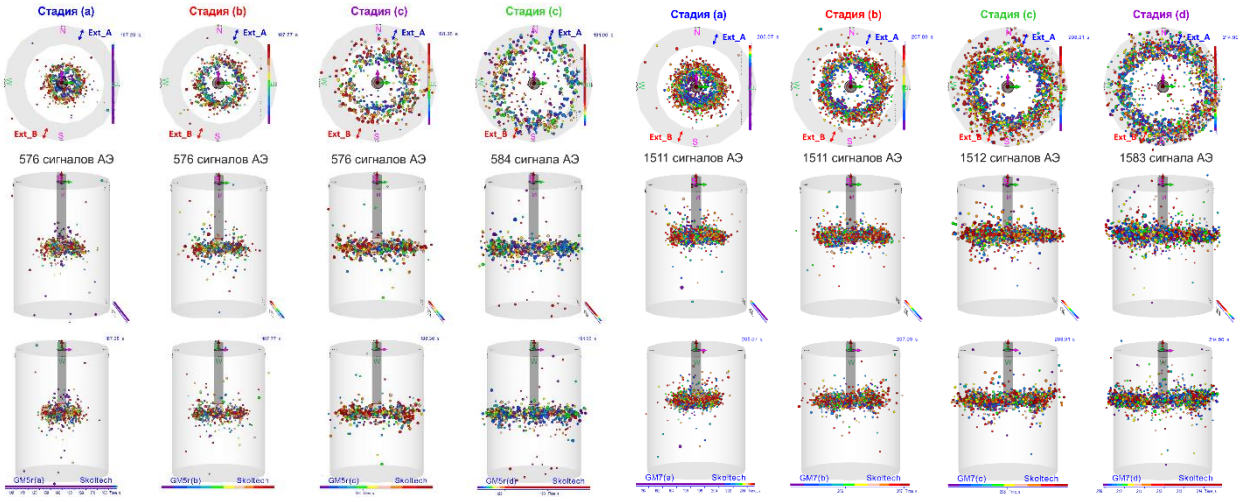


Рисунок 112. Образцы GM5-101 (слева) и GM7-101 (справа): (a) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевая деформация, измеренная левым (красный) и правым (синий) датчиками и кривой, описывающей перемещения поршня (зеленый); (c) объём жидкости, закаченной в трещину гидроразрыва; (d) амплитуда акустических сигналов; (e) и (f) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y, соответственно; (g) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ; (h) распределение залоцированных сигналов АЭ из центра образца к поверхности. Все параметры построены от времени тестирования образцов.

Весь процесс распространения трещины гидроразрыва до цилиндрической поверхности образца был разделен на четыре последовательных временных интервала. На каждой из стадий (a), (b) и (c) было зарегистрировано 576 сигналов АЭ (Рисунок 112). Самая последняя стадия (d) (Рисунок 112) демонстрирует 584 сигнала АЭ, локализованных после момента, когда передний край фронта предразрушения трещины достиг поверхности образца. Анализ полученных результатов (Рисунок 112b-c) показывает, что в момент времени, отмеченный зеленой вертикальной пунктирной линией, в образцах GM5-101 и

GM7-101 были зафиксированы деформации в диапазоне 80,6-87,7 мкм и 75,4-87,1 мкм соответственно (Рисунок 112b). Кроме того, в трещине образца GM5-101 было зарегистрировано 0,4 мл ПМС-10 000, а в трещине образца GM7-101 – 0,31 мл ПМС-100 000 (Рисунок 112c). Эти значения, экспериментально определенные несколькими независимыми датчиками, могут быть использованы для верификации моделей распространения радиальной трещины гидроразрыва.

Для каждой из четырех стадий эксперимента были представлены три ортогональные проекции координат локализованных событий АЭ (Рисунок 113), соответствующие последовательным временным интервалам – стадии (a)-(d). Сферы отображают положения сигналов АЭ в трехмерном пространстве; цвет сфер соответствует шкале времени, расположенной внизу нижнего ряда проекций (Рисунок 113). Диаметр сфер пропорционален амплитуде сигналов АЭ. Вид сверху на ортогональные проекции распределений событий АЭ демонстрирует радиальную форму распространения зоны предразрушения (Рисунок 113, верхний ряд). Положение событий АЭ в пространстве хорошо соотносится с формой трещин, полученных в выполненных экспериментах (Рисунок 112). Стоит обратить внимание, что в случае закачки высоковязкой жидкости существует запаздывание между зоной предразрушения и фронтом жидкости, что было экспериментально подтверждено [Stanchits и др., 2014]. Однако, принимая во внимание симметрию деформации, измеренной на границе образца, можно предположить, что фронт жидкости также распространяется радиально в образцах GM5-101 и GM7-101.



GM5-101 **GM7-101**

Рисунок 113. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов GM5-101 (ПМС-10 000) и GM7-101 (ПМС-100 000).

5.2.2 Дизельная система 3 (ДС-3)

В предыдущих испытаниях гидроразрыв был вызван закачкой высоковязкого силиконового масла (ПМС-10 000 и ПМС-100 000); однако в полевых условиях обычно

используются жидкости с меньшей вязкостью. Поэтому, в следующих двух экспериментах была использована жидкость гидроразрыва ДС-3 на основе дизельного топлива, которая специально разработана сотрудниками сотрудникам кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» для проведения гидравлического разрыва пласта в полевых условиях. Образец GM6-102 был испытан сухим, а образец GM4-101 был предварительно насыщен минеральным маслом Multitherm PG-1. Насыщение образцов обосновано тем, что в естественных условиях большинство пород в коллекторе насыщены пластовым флюидом. Скорость закачки жидкости гидроразрыва в образцы песчаника была постоянной и составила 5мл/мин.

Рисунок 114 демонстрирует результаты экспериментов. На основе анализа результатов АЭ был определен момент, когда трещина гидроразрыва достигла цилиндрической поверхности образца. Чтобы определить этот момент с максимально возможной точностью, был применен метод комбинации нескольких параметров, основанный на анализе пространственного распределения сигналов АЭ (Рисунок 114i) (указывающие на появление сигналов АЭ вблизи границы образца), и использовались амплитуды АЭ, приближающиеся к максимальным значениям (Рисунок 114e) (указывает на появление самых крупных микротрещин). Следует отметить, что при использованной схеме нагружения образца (Рисунок 14) главное минимальное напряжение прикладывалось в вертикальном направлении и поддерживалось постоянным на этапах закачки жидкости и распространения трещины гидроразрыва. Однако во время очень быстрого распространения трещины гидроразрыва массивный поршень нагрузочной рамы не мог отрегулировать свое положение таким образом, чтобы поддерживать постоянное напряжение σ_3. В результате инерции поршня было зафиксировано некоторое увеличение минимального главного напряжения (Рисунок 114d, оранжевый), происходящее главным образом после того, как трещина гидроразрыва достигала цилиндрической поверхности образца. Для всех проанализированных испытаний было специально подтверждено, что в момент, когда трещина гидроразрыва приближалась к цилиндрической поверхности образца, минимальное главное напряжение увеличивалось менее чем на 10% (Рисунок 114d, оранжевый). Согласно параметрам (Рисунок 114), насыщенный образец GM4-101 характеризуется на 13% меньшим давлением жидкости и на 70% большей деформацией образца, чем сухой образец GM6-102. Максимальное значение амплитуд АЭ также немного ниже в насыщенном образце. Несмотря на то, что в сухой и в насыщенный образцы закачивалась одна и та же жидкость, насыщенный образец GM4-101 демонстрирует больший объем жидкости, поступивший в трещину гидроразрыва (Рисунок 114c), большую

осевую деформацию образца, вызванную раскрытием трещины гидроразрыва (Рисунок 114b) и меньшую скорость распространения трещины (Рисунок 114i).

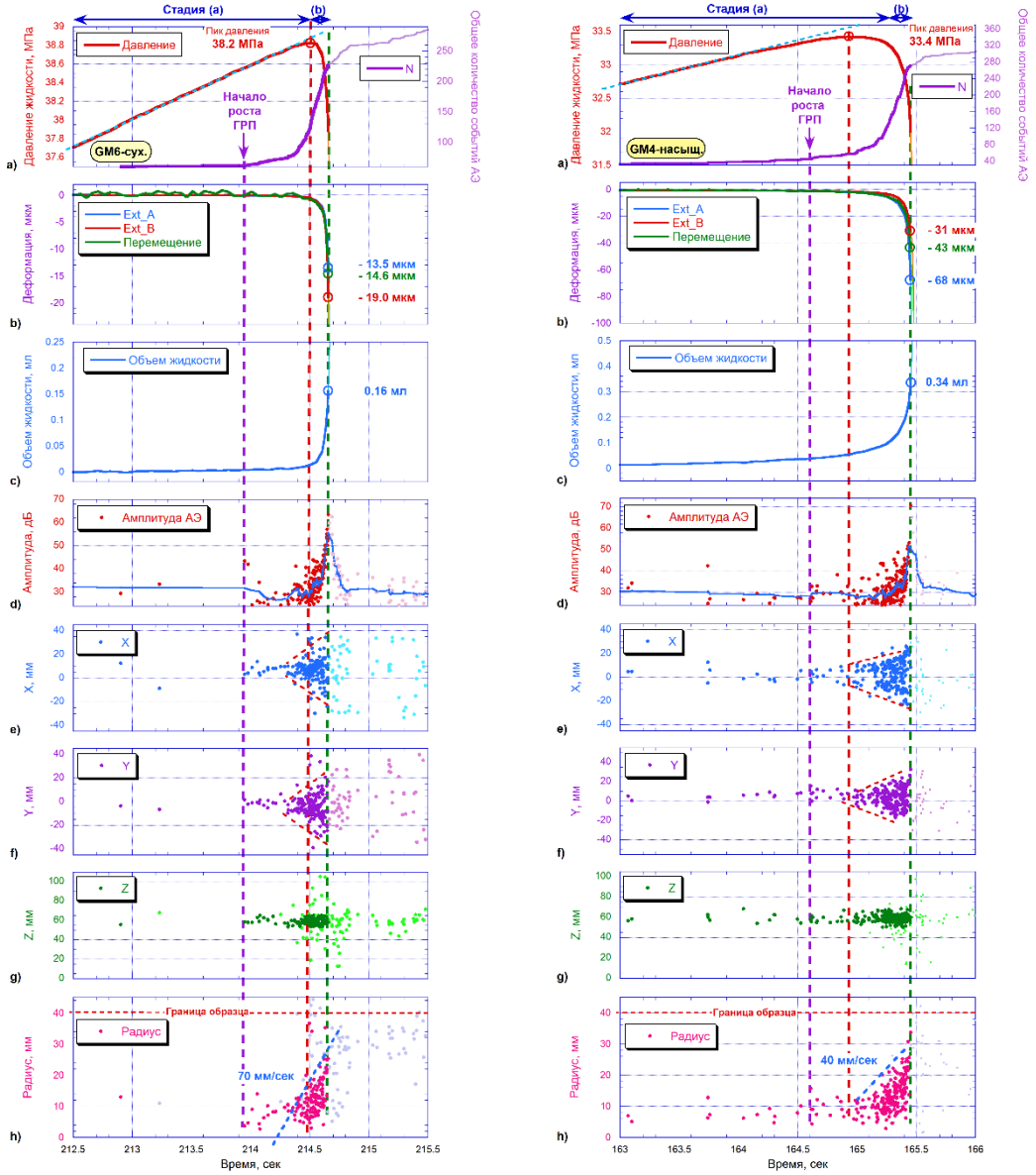


Рисунок 114. Образцы GM6-102 (слева) и GM4-101 (справа): (a) давление закачанной жидкости (красный цвет) и суммарное число залоцированных сигналов АЭ (фиолетовый); (b) осевая деформация, измеренная левым (красный) и правым (синий) датчиками и кривой, описывающей перемещения поршня (зеленый); (c) объём жидкости, закаченной в трещину гидроразрыва; (d) амплитуда акустических сигналов; (e) и (f) горизонтальные координаты залоцированных сигналов АЭ по направлениям X и Y, соответственно; (g) вертикальные координаты залоцированных сигналов АЭ; (h) распределение залоцированных сигналов АЭ из центра образца к поверхности. Все параметры построены от времени тестирования образцов.

Более того, влияние вязкости жидкости на параметры трещины гидроразрыва может быть определено путем сравнения экспериментальных результатов, зарегистрированных при закачке ДС-3 в образец GM4-101 и высоковязкого силиконового масла ПМС-10 000 в образец GM5-101, продемонстрированный выше (Рисунок 112). При закачке менее вязкой жидкости гидроразрыва (ДС-3) было зарегистрировано на 33%

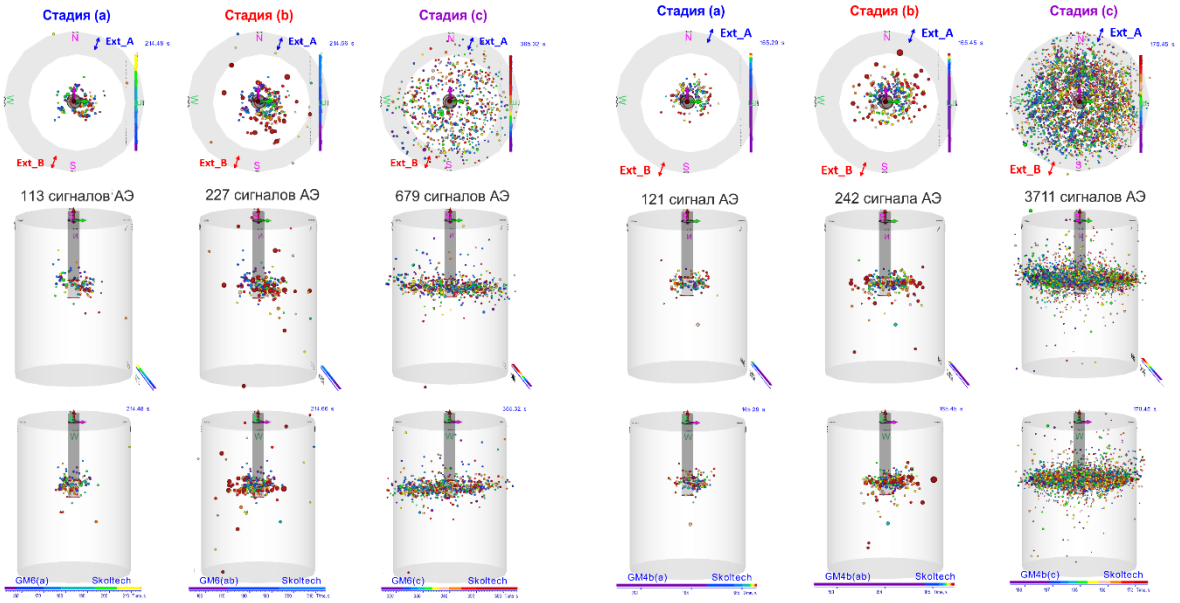
меньшее давление и почти на 40% меньшая деформация образца, связанная с раскрытием трещины гидроразрыва. Кроме того, трещина, вызванная закачкой менее вязкой жидкости (ДС-3), распространяется почти в пять раз быстрее в сухом песчанике и почти в три раза быстрее в насыщенном песчанике, чем трещина, вызванная закачкой силиконового масла ПМС-10 000 в образец GM5-101, насыщенный минеральным маслом (Рисунок 112h).

Рисунок 115 демонстрирует пространственное распределение сигналов АЭ в сухом GM6-102 и насыщенном GM4-101 образцах песчаника, зарегистрированных на трех стадиях эксперимента. Левый столбец графиков, обозначенный как стадия (a), показывает начальную стадию распространения трещины гидроразрыва до момента, когда была зарегистрирована половина от общего числа сигналов АЭ, локализованных до достижения трещиной гидроразрыва поверхности породы. Большинство сигналов АЭ, зарегистрированных на стадии (a), были локализованы вблизи участка открой секции скважины, с небольшой асимметрией, указывающей на предпочтительное направление распространения трещины гидроразрыва на начальной стадии. Средняя колонка, обозначенная как стадия (ab), показывает все события АЭ, локализованные от инициации трещины гидроразрыва до момента, когда трещина достигает цилиндрической поверхности образца. Как было показано выше, этот момент также совпадает с моментом регистрации максимальной амплитуды АЭ (Рисунок 114e). В отличие от почти симметричного роста трещины в сухом образце GM6-102, развитие трещины в насыщенном образце GM4-101 демонстрирует значительную асимметрию. Согласно зарегистрированным событиям АЭ, рост трещины значительно преобладает в северо-восточном направлении или в направлении места установки осевого экстензометра Ext_A (Рисунок 115, верхний ряд, синий). Результаты эксперимента GM4-101 (Рисунок 114b, правая колонка графиков), показывают, что деформация, измеренная экстензометром Ext_A, в момент, когда трещина гидроразрыва достигла поверхности образца, была равна 68 мкм, тогда как в тот же момент экстензометр Ext_B зафиксировал только 31 мкм на противоположной стороне образца. Таким образом, как АЭ, так и измерения деформации независимо подтверждают асимметрию распространения трещины гидроразрыва в образце GM4-101.

Правый столбец графиков, обозначенный стадией (c) (Рисунок 115), демонстрирует активность АЭ на заключительном этапе эксперимента, вызванную распространением трещины гидроразрыва по всему поперечному сечению образца, за которым следует закрытие трещины. Алгоритм нагрузки был разработан таким образом, что после достижения значительного раскрытия трещины гидроразрыва жидкость откачивалась из ствола скважины, и нагружающий поршень быстро возвращался в исходное положение, соответствующее положению неразрушенного образца, обеспечивая закрытие

образованной трещины. Источником сигналов АЭ, записанных на последней стадии (c), служит смыкание шероховатых поверхностей (стенок) трещины, что было непосредственно подтверждено инверсия тензора моментов. АЭ [Bobrova и др., 2021].

Наблюдаемая разница в количестве событий АЭ может быть связана с различием в затухании упругих волн в сухих и насыщенных образцах [Zhao и др., 2021]. Обратите внимание, что закачка высоковязкого ПМС-10 000 в образец GM5-101 (Рисунок 112, Рисунок 113) вызвала значительно большее число событий АЭ, а также большую деформацию образца и больший объем жидкости в трещине, чем закачка менее вязкой ДС-3 в образцы GM6-102 и GM4-101 (Рисунок 114, Рисунок 115). Это может быть объяснено тем, что закачка более вязкой жидкости приводит к большему раскрытию трещины гидроразрыва, что согласуется с [Stanchits и др., 2014]. Во всех выполненных экспериментах положение локализованных событий АЭ в точности повторяют форму полученных трещин (Рисунок 116).



GM6-102 **GM4-101**

Рисунок 115. Три ортогональные проекции положения залоцированных сигналов АЭ в пространстве для образцов GM6-102 и GM4-101.

Как показано в [Shevtsova и др., 2023], образец песчаника, насыщенный минеральным маслом, характеризовался более низкими значениями модуля Юнга, прочности на сжатие и сцепление по сравнению с сухим образцом того же песчаника. В экспериментах гидроразрыва было обнаружено, что насыщенный образец GM4-101 имел более низкое значение давления жидкости и большее раскрытие трещины по сравнению с соответствующими параметрами сухого образца GM6-102. Однако скорость распространения трещины гидроразрыва выше в сухом образце GM6-102.

(**GM6-102**) (**GM4-101**) (**GM5-101**) (**GM7-101**)

Рисунок 116. Фотографии образцов GM6-102, GM4-101, GM5-101 и GM7-101 после эксперимента.

Лабораторные эксперименты по инициации трещины гидроразрыва проводились в насыщенном и сухом песчанике. В ходе испытаний измерялись такие параметры, как давление жидкости в скважине, раскрытие трещины гидроразрыва, объем жидкости, закачанной в трещину, и скорость распространения трещины, которые использовались для оценки поведения трещины (Таблица 28).

Таблица 28. Результаты экспериментов гидроразрыва в песчанике.

№ образца	**GM4-101**	**GM6-102**	**GM5-101**	**GM7-101**
Состояние горной породы	Насыщенный	Сухой	Насыщенный	Насыщенный
Жидкость гидроразрыва	ДС-3	ДС-3	ПМС-10000	ПМС-100000
Вязкость жидкости при скорости сдвига 100^{-c}, сП	1220	1220	10 000	100 000
σ_1, МПа	22			
σ_3, МПа	8			
Давление гидроразрыва (P_b), МПа	33.4	38.2	49.8	53.1
Объем жидкости в трещине, мл	0.34	0.16	0.4	0.31
Раскрытие трещины (Ext_A/ Ext_B), мкм	68/31	13.5/19.0	85.6/80.6	75.4/78.2
Скорость распространения трещины гидроразрыва, мм/сек	40	70	15	3

5.2.3 Выводы к разделу 5.2

Полученные результаты обобщены следующим образом:

1) Выявлено, что насыщение образца перед испытанием оказывает снижающее влияние на давление гидроразрыва, однако значения величины раскрытия трещины и объем закачанного в нее жидкости выше;

2) Также было установлено, что закачка более вязкой жидкости приводит к образованию гидравлического разрыва с более высоким значением давления гидроразрыва и более широким раскрытием трещины;

3) Было обнаружено, что насыщение образца минеральным маслом привело к снижению значения давления гидроразрыва на 14%. Результаты лабораторных экспериментов показывают, что состояние насыщенности может оказывать влияние на параметры гидроразрыва. Полученные лабораторные результаты необходимо учитывать при моделировании ГРП в полевых условиях.

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 инициирующей жидкости в условиях псевдо-трехосных и истинно трехосных условий нагружения, что имеет важное значение для развития методов гидроразвыва 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 CO_2.

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 CO_2 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zhao K., Ran S., Peng Z., Dao-xue Y., Tian-ye T. Effect of moisture content on characteristic stress and acoustic emission characteristics of red sandstone // Rock Soil Mech. 2021. Т. 42. № 4. С. 899–908.
2. Abdelazim R., Rahman S. S. Estimation of permeability of naturally fractured reservoirs by pressure transient analysis: An innovative reservoir characterization and flow simulation // J. Pet. Sci. Eng. 2016. Т. 145. С. 404–422.
3. Abe S., Deckert H. Roughness of fracture surfaces in numerical models and laboratory experiments // Solid Earth. 2021. Т. 12. № 10. С. 2407–2424.
4. Akrad O., Miskimins J., Prasad M. The effects of fracturing fluids on shale rock mechanical properties and proppant embedment // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado, USA: SPE-146658-MS, 2011. С. 2245–2256.
5. ASTM D2845-08. Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock // ASTM Int. West Conshohocken, PA, USA. 2008.
6. ASTM D3967-16. Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens 1 // ASTM Int. West Conshohocken, PA, USA. 2016.
7. ASTM D7012-14. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures // ASTM Int. West Conshohocken, PA, USA. 2014.
8. Barati R., Liang J.-T. A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells // J. Appl. Polym. Sci. 2014. Т. 131. № 16.
9. Barbati A. C., Desroches J., Robisson A., McKinley G. H. Complex Fluids and Hydraulic Fracturing // Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. 2016. Т. 7. № 1. С. 415–453.
10. Blanton T. L. An Experimental Study of Interaction Between Hydraulically Induced and Pre-Existing Fractures // SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. Pittsburgh, Pennsylvania: SPE-10847-MS, 1982.
11. Bobrova M., Stanchits S., Shevtsova A., Filev E., Stukachev V., Shayahmetov T. Laboratory Investigation of Hydraulic Fracture Behavior of Unconventional Reservoir Rocks // Geosciences. 2021. Т. 11. № 7.
12. Breede K., Dzebisashvili K., Liu X., Falcone G. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future // Geotherm. Energy. 2013. Т. 1. № 1.
13. Britt L. K., Hager C. J., Thompson J. W. Hydraulic Fracturing in a Naturally Fractured Reservoir // International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico. Veracruz, Mexico: SPE-28717-MS, 1994.
14. Bukharov D. F., Alekseev Y. V., Prodan A. S., Nenko A. V. Potential and Possible Technological Solutions for Field Development of Unconventional Reservoirs: Bazhenov Formation // SPE Russ. Pet. Technol. Conf. 2020.
15. Cha M., Yin X., Kneafsey T., Johanson B., Alqahtani N., Miskimins J., Patterson T., Wu Y. S. Cryogenic fracturing for reservoir stimulation – Laboratory studies // J. Pet. Sci. Eng. 2014. Т. 124. С. 436–450.
16. Chen S., Yang C., Wang G. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite // Appl. Therm. Eng. 2017. Т. 110. С. 1533–1542.
17. Chen Y., Nagaya Y., Ishida T. Observations of Fractures Induced by Hydraulic Fracturing in

Anisotropic Granite // Rock Mech. Rock Eng. 2015. Т. 48. № 4. С. 1455–1461.
18. Cheng C., Milsch H. Hydromechanical Investigations on the Self - propping Potential of Fractures in Tight Sandstones // Rock Mech. Rock Eng. 2021. Т. 54. № 10. С. 5407–5432.
19. Chieng Z. H., Mohyaldinn M. E., Hassan A. M., Bruining H. Experimental investigation and performance evaluation of modified viscoelastic surfactant (VES) as a new thickening fracturing fluid // Polymers (Basel). 2020. Т. 12. № 7. С. 1–19.
20. Chuprakov D., Melchaeva O., Prioul R. Injection-Sensitive Mechanics of Hydraulic Fracture Interaction with Discontinuities // Rock Mech. Rock Eng. 2014. Т. 47. № 5. С. 1625–1640.
21. Clark J. B. A Hydraulic Process for Increasing the Productivity of Wells // J. Pet. Technol. 1949. Т. 1. № 01. С. 1–8.
22. Daeffler C., Perroni D., Makarychev-Mikhailov S., Mirakyan A. Internal viscoelastic surfactant breakers from in-situ oligomerization // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Galveston, Texas, USA: SPE-193563-MS, 2019.
23. Dahi-Taleghani A., Olson J. E. Numerical Modeling of Multistranded-Hydraulic-Fracture Propagation: Accounting for the Interaction Between Induced and Natural Fractures // SPE J. 2011. Т. 16. № 03. С. 575–581.
24. Deb P., Salimzadeh S., Vogler D., Düber S., Clauser C., Settgast R. R. Verification of Coupled Hydraulic Fracturing Simulators Using Laboratory-Scale Experiments // Rock Mech. Rock Eng. 2021. Т. 54. № 6. С. 2881–2902.
25. Deng J. G., Chen Z. R., Geng Y. N., Liu S. J., Zhu H. Y. Prediction model for in-situ formation stress in shale reservoirs // J. China Univ. Pet. 2013. Т. 37. № 6. С. 59–64.
26. Dogon D., Golombok M. Self-regulating solutions for proppant transport // Chem. Eng. Sci. 2016. Т. 148. С. 219–228.
27. 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 Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, Russia: SPE-191721-18RPTC-MS, 2018.
28. Dubinya N., Trimonova M., Nachev V. Numerical Modeling of Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Rock Mass - A Continuous Description Perspective // EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online. : European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. С. 1–5.
29. Durairaj R. Rheology - New Concepts, Applications and Methods. : InTech, 2013.
30. Edrisi A. R., Kam S. I. A New Foam Rheology Model for Shale-Gas Foam Fracturing Applications // SPE Canadian Unconventional Resources Conference. Calgary, Alberta, Canada: SPE-162709-MS, 2012.
31. Fan L. F., Gao J. W., Wu Z. J., Yang S. Q., Ma G. W. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique // Appl. Therm. Eng. 2018. Т. 140. С. 505–519.
32. Fink J. K. Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluids Technology. : Elsevier Inc., 2013. Вып. 1. 1–248 с.
33. Fink J. K. Fracturing Fluids // Water-Based Chemicals and Technology for Drilling, Completion, and Workover Fluids / под ред. J. K. Fink. : Gulf Professional Publishing, 2015. С. 115–178.
34. Fisher K., Warpinski N. Hydraulic-Fracture-Height Growth: Real Data // SPE Prod. Oper.

2012. Т. 27. № 01. С. 8–19.
35. Fjær E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R. Chapter 11 Mechanics of hydraulic fracturing // Petroleum Related Rock Mechanics 2nd Edition / под ред. E. Fjær и др. : Elsevier, 2008. С. 369–390.
36. Gabnasyrov A. V., Lyadova N. A., Putilov I. S., Solovyev S. I. Domanik Shale Oil: Unlocking Potential // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition. Moscow, Russia: SPE-182075-MS, 2016.
37. Gale J. F. W., Reed R. M., Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 2014. Т. 91. № 4. С. 603–622.
38. Gandossi L., Estorff U. Von. An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production—Update 2015. European Union: Publications Office, 2015.
39. Gaurina-Međimurec N., Brkić V., Topolovec M., Mijić P. Fracturing Fluids and Their Application in the Republic of Croatia // Appl. Sci. 2021. Т. 11. № 6.
40. Gierzynski A. Implications of Permeability Uncertainty During Three-phase CO2 Flow in a Basalt Fracture Network // 2016.
41. Goodfellow S. D., Nasseri M. H. B., Maxwell S. C., Young R. P. Hydraulic fracture energy budget: Insights from the laboratory // Geophys. Res. Lett. 2015. Т. 42. № 9. С. 3179–3187.
42. Grundmann S. R., Rodvelt G. D., Dials G. A., Allen R. E. Cryogenic Nitrogen as a Hydraulic Fracturing Fluid in the Devonian Shale // SPE Eastern Regional Meeting. Pittsburgh, Pennsylvania: SPE-51067-MS, 1998.
43. Guo F., Morgenstern N. R., Scott J. D. An experimental investigation into hydraulic fracture propagation-Part 2. Single well tests // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1993. Т. 30. № 3. С. 189–202.
44. Guo T., Zhang S., Qu Z., Zhou T., Xiao Y., Gao J. Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume // Fuel. 2014. Т. 128. С. 373–380.
45. Gupta D. V. S., Hlidek B. T., Hill E. S. W., Dinsa H. S. Fracturing Fluid for Low-Permeability Gas Reservoirs: Emulsion of Carbon Dioxide With Aqueous Methanol Base Fluid: Chemistry and Applications // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference / под ред. SPE-106304-MS. College Station, Texas: SPE-106304-MS, 2007.
46. Gupta D. V. S. Unconventional Fracturing Fluids for Tight Gas Reservoirs // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. The Woodlands, Texas: SPE-119424-MS, 2009.
47. Haimson B. C. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1978. Т. 15. № 4. С. 167–178.
48. Hainey B. W., Keck R. G., Smith M. B., Lynch K. W., Barth J. W. On-site Fracturing Disposal of Oilfield-Waste Solids in Wilmington Field, California // SPE Prod. Facil. 1999. Т. 14. № 02. С. 88–93.
49. Henderson J. Tight Oil Developments in Russia. , 2013.
50. Hernández J. M., Fernández C. T., Scianca N. M. Methanol as Fracture Fluid in Gas Wells // SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference. Buenos Aires, Argentina: SPE-27007-MS, 1994.
51. Hou X., Lu Y., Fang B., Qiu X., Cui W. Waterless fracturing fluid with low carbon hydrocarbon as base fluid for unconventional reservoirs // Pet. Explor. Dev. 2013. Т. 40. № 5. С. 646–650.
52. Howard G. C., Fast C. R. Hydraulic Fracturing. N.Y.- Dallas: SPE of AIME, 1970. 210 с.

53. Hu L., Ghassemi A., Riley S., Kahn D. Lab-Scale Experiments Investigating the Possibility of Bedding Plane Slip Events During Microseismic Monitoring of Hydraulic Fracturing // 53rd U.S. Rock Mech. Symp. 2019. C. ARMA-2019-1870.
54. Huang B., Li P. Experimental Investigation on the Basic Law of the Fracture Spatial Morphology for Water Pressure Blasting in a Drillhole Under True Triaxial Stress // Rock Mech. Rock Eng. 2015. T. 48. № 4. C. 1699–1709.
55. Hubbert M. K., Willis D. G. Mechanics Of Hydraulic Fracturing // Trans. AIME. 1957. T. 210. № 01. C. 153–168.
56. Jaworski G. W., Duncan J. M., Seed H. B. Laboratory Study of Hydraulic Fracturing // J. Geotech. Eng. Div. 1981. T. 107. № 6. C. 713–732.
57. Jia Y., Lu Z., Liu H., Wang J., Cheng Y., Zhang X. Fracture Propagation and Morphology Due to Non-Aqueous Fracturing: Competing Roles between Fluid Characteristics and In Situ Stress State // Minerals. 2020. T. 10. № 5.
58. Kadir A. Quick Start Guide. , 2022. 1–10 c.
59. Kalam S., Afagwu C., Jaberi J. Al, Siddig O. M., Tariq Z., Mahmoud M., Abdulraheem A. A review on non-aqueous fracturing techniques in unconventional reservoirs // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2021. T. 95.
60. Kartseva T. I., Smirnov V. B., Patonin A. V, Sergeev D. S., Shikhova N. M., Ponomarev A. V, Stroganova S. M., Mikhailov V. O. Initiation of Rock Fracture by Fluids of Different Viscosities // Izv. Phys. Solid Earth. 2022. T. 58. № 4. C. 576–590.
61. King G. E. Thirty years of gas-shale fracturing: What have we learned? // JPT, J. Pet. Technol. 2010. T. 62. № 11. C. 88–90.
62. Kolawole O., Ispas I. Interaction between hydraulic fractures and natural fractures: current status and prospective directions // J. Pet. Explor. Prod. Technol. 2020. T. 10. № 4. C. 1613–1634.
63. Komar C. A., Yost A. B., Sinclair A. R. Practical Aspects Of Foam Fracturing In The Devonian Shale // Softw. - Pract. Exp. 1979.
64. Kumari W. G. P., Ranjith P. G., Perera M. S. A., Li X., Li L. H., Chen B. K., Isaka B. L. A., Silva V. R. S. De. Hydraulic fracturing under high temperature and pressure conditions with micro CT applications: Geothermal energy from hot dry rocks // Fuel. 2018. T. 230. C. 138–154.
65. Legarth B., Huenges E., Zimmermann G. Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2005. T. 42. № 7. C. 1028–1041.
66. Leonard M., Kennett B. L. N. Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms // Phys. Earth Planet. Inter. 1999. T. 113. № 1–4. C. 247–263.
67. Li B. Q., Gonçalves da Silva B., Einstein H. Laboratory hydraulic fracturing of granite: Acoustic emission observations and interpretation // Eng. Fract. Mech. 2019. T. 209. C. 200–220.
68. Li G., Sheng M., Tian S., Huang Z., Li Y., Yuan X. Multistage hydraulic jet acid fracturing technique for horizontal wells // Pet. Explor. Dev. 2012. T. 39. № 1. C. 107–112.
69. Li J., Tellakula R., Rosencrance S. Cross-linked acrylamide polymer or copolymer gel and breaker compositions and methods of use // 2015. C. 1–38.
70. Li N., Dai J., Li J., Bai F., Liu P., Luo Z. Application status and research progress of shale reservoirs acid treatment technology // Nat. Gas Ind. B. 2016. T. 3. № 2. C. 165–172.
71. Li N., Ma X., Zhang S., Zou Y., Wu S., Li S., Zhang Z., Cao T. Thermal Effects on the Physical and Mechanical Properties and Fracture Initiation of Laizhou Granite During Hydraulic Fracturing

// Rock Mech. Rock Eng. 2020. Т. 53. № 6. С. 2539–2556.
72. Li Q., Xing H., Liu J., Liu X. A review on hydraulic fracturing of unconventional reservoir // Petroleum. 2015. Т. 1. № 1. С. 8–15.
73. Li Y., Wang S., Guo J., Gou X., Jiang Z., Pan B. Reduced adsorption of polyacrylamide-based fracturing fluid on shale rock using urea // Energy Sci. Eng. 2018. Т. 6. № 6. С. 749–759.
74. Liang Y., Cheng Y., Zou Q., Wang W., Ma Y., Li Q. Response characteristics of coal subjected to hydraulic fracturing: An evaluation based on real-time monitoring of borehole strain and acoustic emission // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2017. Т. 38. № December. С. 402–411.
75. Liu Y., Xu T., Yuan Y., Feng B., Tang X., Liu X., Cui Z. A laboratory study on fracture initiation and propagation of granite under cyclic-injection hydraulic fracturing // J. Pet. Sci. Eng. 2022. Т. 212.
76. Llanos E. M., Jeffrey R. G., Hillis R., Zhang X. Hydraulic Fracture Propagation Through an Orthogonal Discontinuity: A Laboratory, Analytical and Numerical Study // Rock Mech. Rock Eng. 2017. Т. 50. № 8. С. 2101–2118.
77. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1993. Т. 30. № 7. С. 883–899.
78. Lu C., Jiang H., Yang J., Yang H., Cheng B., Zhang M., He J., Li J. Simulation and optimization of hydraulic fracturing in shale reservoirs: A case study in the Permian Lucaogou formation, China // Energy Reports. 2022. Т. 8. С. 2558–2573.
79. Lu Y., Yang F., Ge Z., Wang Q., Wang S. Influence of viscoelastic surfactant fracturing fluid on permeability of coal seams // Fuel. 2017. Т. 194. С. 1–6.
80. Mack M. G., Warpinski N. R. Chapter 6. Mechanics of Hydraulic Fracturing // Reservoir Stimulation, Third edition / под ред. M. J. Economides, K. G. Nolte. : Wiley, 2000. С. 190–238.
81. Mahmud H. Ben. A Review of Fracturing Technologies Utilized in Shale Gas Resources / под ред. M. Ermila. Rijeka: IntechOpen, 2020.
82. Mao J., Yang X., Chen Y., Zhang Z., Zhang C., Yang B., Zhao J. Viscosity reduction mechanism in high temperature of a Gemini viscoelastic surfactant (VES) fracturing fluid and effect of counter-ion salt (KCl) on its heat resistance // J. Pet. Sci. Eng. 2018. Т. 164. С. 189–195.
83. Mao R., Feng Z., Liu Z., Zhao Y. Laboratory hydraulic fracturing test on large-scale pre-cracked granite specimens // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2017. Т. 44. С. 278–286.
84. McClure M. W., Horne R. N. An investigation of stimulation mechanisms in Enhanced Geothermal Systems // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2014. Т. 72. С. 242–260.
85. Mojid M. R., Negash B. M., Abdulelah H., Jufar S. R., Adewumi B. K. A state – of – art review on waterless gas shale fracturing technologies // J. Pet. Sci. Eng. 2021. Т. 196.
86. Montgomery C. T., Smith M. B. Hydraulic Fracturing: History of an Enduring Technology // J. Pet. Technol. 2010. Т. 62. № 12. С. 26–40.
87. Moreno C., Chitrala Y., Sondergeld C., Rai C. Laboratory studies of hydraulic fractures in tight sands at different applied stresses // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011 SEG Technical Program Expanded Abstracts. : Society of Exploration Geophysicists, 2011. С. 1550–1554.
88. Mueller M., Amro M., Haefner F. K., Hossain M. M. Stimulation of Tight Gas Reservoir using coupled Hydraulic and CO2 Cold-frac Technology // SPE Asia Pacific Oil Gas Conf. Exhib. 2012.
89. Nelder J. A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // Comput. J. 1965.
90. Olasolo P., Juárez M. C., Morales M. P., D´Amico S., Liarte I. A. Enhanced geothermal

systems (EGS): A review // Renew. Sustain. Energy Rev. 2016. Т. 56. С. 133–144.
91. Oye V., Stanchits S., Babarinde O., Bauer R., Dichiarante A. M., Langet N., Goertz-Allmann B., Frailey S. Cubic-meter scale laboratory fault re-activation experiments to improve the understanding of induced seismicity risks // Sci. Rep. 2022. Т. 12. № 1.
92. Patel S. M., Sondergeld C. H., Rai C. S. Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2017. Т. 95. № August 2016. С. 8–15.
93. Pater C. J. de, Cleary M. P., Quinn T. S., Barr D. T., Johnson D. E., Weijers L. Experimental Verification of Dimensional Analysis for Hydraulic Fracturing // SPE Prod. Facil. 1994. Т. 9. № 04. С. 230–238.
94. Perfetto R., Melo R. C. B., Martocchia F., Lorefice R., Ceccarelli R., Tealdi L., Okassa F. Oil-Based Fracturing Fluid: First Results in West Africa Onshore // International Petroleum Technology Conference. Beijing, China: IPTC-16640-MS, 2013. С. 1621–1633.
95. Perkins T. K., Kern L. R. Widths of Hydraulic Fractures // J. Pet. Technol. 1961. Т. 13. № 9. С. 937–949.
96. Pollard D. D., Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century // Geol. Soc. Am. Bull. 1988. Т. 100. С. 1181–1204.
97. Qian Y., Guo P., Wang Y., Zhao Y., Lin H., Liu Y. Advances in Laboratory-Scale Hydraulic Fracturing Experiments // Adv. Civ. Eng. 2020. Т. 2020.
98. Qui P., Yakushev V. S. The applicability of Hydraulic Fracturing technologies for the development of shale gas formations in Sichuan basin (based on the analogy between american and chinese horizons) // Ehe news gas Sci. 2016. Т. 26. № 2. С. 39–46.
99. Raaen A. M., Skomedal E., Kjørholt H., Markestad P., Økland D. Stress determination from hydraulic fracturing tests: the system stiffness approach // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2001. Т. 38. № 4. С. 529–541.
100. Rabaa W. El. Experimental Study of Hydraulic Fracture Geometry Initiated From Horizontal Wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas: SPE-19720-MS, 1989.
101. Renshaw C. E., Pollard D. D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1995. Т. 32. № 3. С. 237–249.
102. Richtering W. Rheology and shear induced structures in surfactant solutions // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2001. Т. 6. № 5–6. С. 446–450.
103. Rimmer B., MacFarlane C., Mitchell C., Wolfs H., Samuel M. Fracture geometry optimization: designs utilizing new polymer-free fracturing fluid and log-derived stress profile/rock properties // Proc. - SPE Int. Symp. Form. Damage Control. 2000. Т. 3. С. 461–467.
104. Robert L. Horton. Oil-based hydraulic fracturing fluids and breakers and methods of preparation and use // 2010. Т. 582. № 61.
105. Rowan T. M. Spurring the Devonian: Methods of Fracturing the Lower Huron in Southern West Virginia and Eastern Kentucky // SPE Eastern Regional Meeting. Charleston, West Virginia, USA: SPE-125735-MS, 2009.
106. Rummel F., Winter R. B. Application of Laboratory Fracture Mechanics Data to Hydraulic Fracturing Field Tests BT - Hydraulic fracturing and geothermal energy / под ред. S. Nemat-Nasser, H. Abé, S. Hirakawa. Dordrecht: Springer Netherlands, 1983. С. 493–501.
107. Saba T., Mohsen F., Murphy B., Garry M., Hilbert B. White paper: Methanol use in hydraulic

fracturing fluids // Expon. Maynard, MA, USA. 2012.
108. Sarmadivaleh M., Rasouli V., Shihab N. K. Hydraulic fracturing in an unconventional naturally fractured reservoir: a numerical and experimental study // APPEA J. 2011. Т. 51. № 1. С. 507–518.
109. 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. Т. 15. № 11.
110. 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. Т. 13. № 6.
111. Shibaev A. V, Osiptsov A. A., Philippova O. E. Novel Trends in the Development of Surfactant-Based Hydraulic Fracturing Fluids: A Review // Gels. 2021. Т. 7. № 4.
112. Silin M., Magadova L., Malkin D., Krisanova P., Borodin S., Filatov A. Applicability Assessment of Viscoelastic Surfactants and Synthetic Polymers as a Base of Hydraulic Fracturing Fluids // Energies. 2022. Т. 15. № 8.
113. Sinal M. L., Lancaster G. Liquid CO2 Fracturing: Advantages and Limitations // J. Can. Pet. Technol. 1987. Т. 26. № 05.
114. Smirnov V. B. и др. Fluid Initiation of Fracture in Dry and Water Saturated Rocks // Izv. Phys. Solid Earth. 2020. Т. 56. № 6. С. 808–826.
115. Sneddon I. N. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid // Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci. 1946. Т. 187. № 1009. С. 229–260.
116. Sneddon I. N., Elliot H. A. The opening of a Griffith crack under internal pressure // Q. Appl. Math. 1946. Т. 4. № 3. С. 262–267.
117. Soeder D. J. The successful development of gas and oil resources from shales in North America // J. Pet. Sci. Eng. 2018. Т. 163. № January. С. 399–420.
118. Speight J. G. Chapter Five - Hydraulic Fracturing // Deep Shale Oil and Gas / под ред. J. G. B. T.-D. S. O. and G. Speight. Boston: Gulf Professional Publishing, 2017. С. 209–260.
119. Stanchits S., Surdi A., Gathogo P., Edelman E., Suarez-Rivera R. Onset of Hydraulic Fracture Initiation Monitored by Acoustic Emission and Volumetric Deformation Measurements // Rock Mech. Rock Eng. 2014. Т. 47. № 5. С. 1521–1532.
120. Stanchits S. A., Lockner D. A., Ponomarev A. V. Anisotropic Changes in P-Wave Velocity and Attenuation during Deformation and Fluid Infiltration of Granite // Bull. Seismol. Soc. Am. 2003. Т. 93. № 4. С. 1803–1822.
121. Stanchits S., Burghardt J., Surdi A. Hydraulic Fracturing of Heterogeneous Rock Monitored by Acoustic Emission // Rock Mech. Rock Eng. 2015. Т. 48. № 6. С. 2513–2527.
122. Stanchits S., Vinciguerra S., Dresen G. Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite // Pure Appl. Geophys. 2006. Т. 163. № 5–6. С. 974–993.
123. Stoeckhert F., Molenda M., Brenne S., Alber M. Fracture propagation in sandstone and slate – Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2015. Т. 7. № 3. С. 237–249.
124. Sullivan P. F., Gadiyar B., Morales R. H., Hollicek R., Sorrells D., Lee J., Fischer D. Optimization of a Viscoelastic Surfactant (VES) fracturing fluid for application in high-permeability formations // Proc. - SPE Int. Symp. Form. Damage Control. 2006. Т. 2006. С. 753–760.

125. Tan P., Hu X., Jin Y., Fu S. Observation of Hydraulic Fracture Morphology for Laboratory Experiments by Using Multiple Methods // Geotech. Geol. Eng. 2021. Т. 39. № 7. С. 4997–5005.
126. Tao J., Meng S., Jin X., Xu J., Yang Q., Wang X., Liu H., Peng B. Stimulation and Sequestration Mechanism of CO2 Waterless Fracturing for Continental Tight Oil Reservoirs // ACS Omega. 2021. Т. 6. № 32. С. 20758–20767.
127. Tester J. W. и др. The future of geothermal energy // Massachusetts Inst. Technol. 2006. Т. 358. С. 1–3.
128. Turuntaev S. B., Zenchenko E. V, Zenchenko P. E., Trimonova M. A. Hydraulic Crack Growth Dynamics from Ultrasound Transmission Monitoring in Laboratory Experiments // Izv. Phys. Solid Earth. 2021. Т. 57. № 5. С. 671–685.
129. Wang L., Yao B., Cha M., Alqahtani N. B., Patterson T. W., Kneafsey T. J., Miskimins J. L., Yin X., Wu Y.-S. Waterless fracturing technologies for unconventional reservoirs-opportunities for liquid nitrogen // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2016. Т. 35. С. 160–174.
130. Wang Y., Li C. H. Investigation of the Effect of Cemented Fractures on Fracturing Network Propagation in Model Block with Discrete Orthogonal Fractures // Rock Mech. Rock Eng. 2017. Т. 50. № 7. С. 1851–1862.
131. Warpinski N. R., Teufel L. W. Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation (includes associated papers 17011 and 17074) // J. Pet. Technol. 1987. Т. 39. № 02. С. 209–220.
132. Wasantha P. L. P., Ranjith P. G., Zhang Q. B., Xu T. Do joint geometrical properties influence the fracturing behaviour of jointed rock? An investigation through joint orientation // Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resources. 2015. Т. 1. № 1–2. С. 3–14.
133. Weeren H. O. Disposal of radioactive wastes by hydraulic fracturing Part III. Design of ORNL’s shale-fracturing plant // Nucl. Eng. Des. 1966. Т. 4. № 1. С. 108–117.
134. Yang B., Wang H., Wang B., Shen Z., Zheng Y., Jia Z., Yan W. Digital quantification of fracture in full-scale rock using micro-CT images: A fracturing experiment with N2 and CO2 // J. Pet. Sci. Eng. 2021a. Т. 196.
135. Yang R., Hong C., Huang Z., Wen H., Li X., Huang P., Liu W., Chen J. Liquid Nitrogen Fracturing in Boreholes under True Triaxial Stresses: Laboratory Investigation on Fractures Initiation and Morphology // SPE J. 2021b. Т. 26. № 01. С. 135–154.
136. Yang S.-Q., Tian W.-L., Elsworth D., Wang J.-G., Fan L.-F. An Experimental Study of Effect of High Temperature on the Permeability Evolution and Failure Response of Granite Under Triaxial Compression // Rock Mech. Rock Eng. 2020. Т. 53. № 10. С. 4403–4427.
137. Yang X., Mao J., Zhang Z., Zhang H., Yang B., Zhao J. Rheology of Quaternary Ammonium Gemini Surfactant Solutions: Effects of Surfactant Concentration and Counterions // J. Surfactants Deterg. 2018. Т. 21. № 4. С. 467–474.
138. Yin Q., Liu R., Jing H., Su H., Yu L., He L. Experimental Study of Nonlinear Flow Behaviors Through Fractured Rock Samples After High-Temperature Exposure // Rock Mech. Rock Eng. 2019. Т. 52. № 9. С. 2963–2983.
139. Zhai H., Chang X., Wang Y., Lei X., Xue Z. Analysis of acoustic emission events induced during stress unloading of a hydraulic fractured Longmaxi shale sample // J. Pet. Sci. Eng. 2020. Т. 189.
140. Zhang C., Long X., Tang X., Lekomtsev A., Korobov G. Y. Implementation of water treatment processes to optimize the water saving in chemically enhanced oil recovery and

hydraulic fracturing methods // Energy Reports. 2021. T. 7. C. 1720–1727.
141. Zhang J., Zhang S., Bian X., Zhuang Z., Guo T. Experimental evaluation of fracture stabilizers // Pet. Explor. Dev. 2013. T. 40. № 2. C. 254–258.
142. Zhang J., Kamenov A., Zhu D., Hill A. D. D. Laboratory Measurement of Hydraulic-Fracture Conductivities in the Barnett Shale // SPE Prod. Oper. 2014. T. 29. № 03. C. 216–227.
143. Zhang J., Bian X. Numerical simulation of hydraulic fracturing coalbed methane reservoir with independent fracture grid // Fuel. 2015. T. 143. C. 543–546.
144. Zhang Q., Zhang X.-P., Sun W. A review of laboratory studies and theoretical analysis for the interaction mode between induced hydraulic fractures and pre-existing fractures // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2021. T. 86.
145. Zhang W., Qu Z., Guo T., Wang Z. Study of the enhanced geothermal system (EGS) heat mining from variably fractured hot dry rock under thermal stress // Renew. Energy. 2019a. T. 143. C. 855–871.
146. Zhang X.-S., Wang H.-J., Ma F., Sun X.-C., Zhang Y., Song Z.-H. Classification and characteristics of tight oil plays // Pet. Sci. 2016. T. 13. № 1. C. 18–33.
147. Zhang Y., Ma Y., Hu Z., Lei H., Bai L., Lei Z., Zhang Q. An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite // Renew. Energy. 2019b. T. 140. C. 615–624.
148. Zhang Z., Mao J., Yang X., Zhao J., Gregory S. Environmental Effects Advances in waterless fracturing technologies for unconventional reservoirs // Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff. 2018. T. 00. № 00. C. 1–15.
149. Zhang Z., Mao J., Yang X., Zhao J., Smith G. S. Advances in waterless fracturing technologies for unconventional reservoirs // Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff. 2019c. T. 41. № 2. C. 237–251.
150. Zhao Y., Zhang Y., Yang H., Liu Q., Tian G. Experimental study on relationship between fracture propagation and pumping parameters under constant pressure injection conditions // Fuel. 2022. T. 307.
151. Zhigulskiy S., Lukin S. Evaluation of Conductive Fracture Aperture Based on a Detailed Geomechanical Model: Myth or Reality in the Context of Complex Fractured Reservoir? // SPE Russian Petroleum Technology Conference / под ред. SPE-196896-MS. Moscow, Russia: , 2019.
152. Zhou Z., Jin Y., Zeng Y., Zhang X., Zhou J., Zhuang L., Xin S. Investigation on fracture creation in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing // Renew. Energy. 2020. T. 153. C. 301–313.
153. Zhu J., Hu K., Lu X., Huang X., Liu K., Wu X. A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects // Energy. 2015. T. 93. C. 466–483.
154. Zhu Q., Feng Y., Cai M., Liu J., Wang H. Interpretation of the extent of hydraulic fracturing for rockburst prevention using microseismic monitoring data // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2017. T. 38. C. 107–119.
155. Zhuang L., Kim K. Y., Jung S. G., Diaz M., Min K.-B. Effect of Water Infiltration, Injection Rate and Anisotropy on Hydraulic Fracturing Behavior of Granite // Rock Mech. Rock Eng. 2019. T. 52. № 2. C. 575–589.
156. Zimmermann G., Blöcher G., Reinicke A., Brandt W. Rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing to enhance a geothermal system — Concepts and field results // Tectonophysics.

2011. Т. 503. № 1. С. 146–154.
157. Zoback M. D., Rummel F., Jung R., Raleigh C. B. Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1977. Т. 14. № 2. С. 49–58.
158. Бек Д. Д., Ахтямова А. И., Мясников А. В., Стенин В. П., Стефанов Ю. П., Альчибаев Д. В. Оптимизация высокоскоростной закачки при ГРП горизонтальных скважин формаций баженовской свиты на примере Вынгаяхинского разреза // Нефтяное хозяйство. 2017. № 4. С. 90–95.
159. ГОСТ 21153.3-85. «Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном растяжении». Москва: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 14 с.
160. ГОСТ 21153.7-75. «Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн». Москва: Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. 8 с.
161. ГОСТ 21153.8-88. «Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии». Москва: Гос. комитет СССР по стандартам, 1988. 15 с.
162. ГОСТ 28985–91. «Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии». Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 15 с.
163. Желтов Ю. П., Христианович С. А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. ОТН. 1955. № 5. С. 3–41.
164. Жигульский С. В., Тихоцкий С. А. Оценка раскрытости системы трещин в условиях изменения коэффициента шероховатости трещины на основе данных о напряженно-деформированном состоянии // Бурение и Нефть. 2020. № 4. С. 30–38.
165. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Химуля В. В., Шевцов Н. И. Определение параметров метода направленной разгрузки пласта на основе физического моделирования на установке истинно трехосного нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 258. № 0 SE-Современные тенденции освоения углеводородных ресурсов. С. 906–914.
166. Коврижных А. М., Барышников В. Д. Анализ теоретических и экспериментальных результатов по гидроразрыву цилиндрической и сферической полостей // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. Т. 8. № 1. С. 86–92.
167. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 6. С. 3–9.
168. Курленя М. В., Леонтьев А. В., Попов С. Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // ФТПРПИ. 1994. № 1. С. 3–20.
169. Магадова Л. А., Силин М. А., Глущенко В. Н. Нефтепромысловая химия. Технологические аспекты и материалы для гидроразрыва пластаучеб. пособие для вузов. Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 423 с.
170. Миляев Д. В., Савельева А. Д. Оценка перспективности освоения сланцевой нефти Куонамской свиты восточной Сибири в современных условиях // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2017. Т. 3. № 40. С. 68–82.
171. Михалькова В. Н., Бражников О. Г., Берестецкая А. М. Выбор направлений поиска месторождений нефти и газа в западной части Прикаспийской впадины // Геология нефти и газа. 1990. № 5. С. 10–13.

172. Остроухов С. Б., Цыганкова В. А., Попова П. Ф., Крук П. Н. К вопросу о генезисе нефтегазоносносных подсолевых нижнеартинских отложений Западного Прикаспия // Недра Поволжья и Прикаспия. 2019. № 100. С. 49–61.
173. Патутин А. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н. Разработка устройства для гидроразрыва крупноразмерных образцов в лабораторных условиях // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. Т. 8. № 1. С. 309–314.
174. Патутин А. В., Скулкин А. А. Исследование особенностей гидроразрыва х-образной системы скважин в лабораторных условиях // Проблемы недропользования. 2023. № 2. С. 47–56.
175. Попов С. Н., Метляев Е. И. Анализ эффективности проведения гидроразрыва пласта в нагнетательных скважинах (на примере одного одного из месторождений Северной Африки) // Нефтепромысловое дело. 2017. № 8. С. 33–38.
176. Пунанова С. А., Чахмахчев В. А., Агафонова З. Г., Кукушкина З. П., Гордадзе Т.И. Геохимия нефти подсолевых отложений западного обрамления прикаспия // Геология нефти и газа. 1996. № 7. С. 27–35.
177. Розонов Ю. Е. Разработка активного способа охраны горных выработок на основе направленного гидроразрыва горного массива. Москва: Горная книга, 2021.
178. Савенок О. В., Поварова Л. В., Аванесов А. С. Применение метода гидроразрыва пласта для повышения дебита нефти на Вынгапуровском месторождении // Булатовские чтения. 2018. С. 133–138.
179. Сердюков С. В., Курленя М. В. Анализ эффективности дегазации угольного пласта скважинами и трещинами гидроразрыва // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2019. Т. 6. № 1. С. 225–231.
180. Сердюков С. В., Шилова Т. В. Проппант и рабочие жидкости для создания дренажных каналов в угольном пласте методом гидроразрыва // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. № 6. С. 188–196.
181. Силин М. А., Магадова Л. А., Малкин Д. Н., Крисанова П. К., Крашевникова В. А. Разработка вязкоупругой композиции на основе поверхностно-активных веществ для гидравлического разрыва пласта // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2020. Т. 298. № 1. С. 142–154.
182. Шевцова А. А. Методика лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 7/8. С. 3–17.
183. EinScan HX Hybrid Blue Laser & LED Light Source Handheld 3D Scanner [Электронный ресурс]. URL: https://www.einscan.com/einscan-hx/.
184. Non-Toxic Heat Transfer Fluid MultiTherm PG-1. Phisical properties [Электронный ресурс]. URL: https://www.multitherm.com/pg-1-phys-prop.html.
185. Tashmurunsky quarry [Электронный ресурс]. URL: https://uraltash.ru/karer /.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Справки о внедрении методики лабораторных исследований

Общество с ограниченной ответственностью
«Новосибирский Научно-технический Центр»
630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 4Г, оф. 506
тел: +7 (383) 37-55-226
www.nntc.pro
e-mail: info@nntc.pro

Novosibirsk R&D Center

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ННТЦ»
_____ В.Н. Ульянов
«29» сентября 2023 г.

СПРАВКА

Настоящая справка подтверждает, что результаты диссертационной работы Шевцовой Анны Александровны «Закономерности поведения трещины гидроразрыва горных пород, инициированной закачкой жидкостей с широким диапазоном реологических свойств» в виде «Методики лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей» переданы в Общество с ограниченной ответственностью «Новосибирский Научно-технический Центр» (ООО «ННТЦ») и предполагаются к практическому использованию.

Предложенная методика будет использована при планировании и проведении лабораторных исследований трещин гидроразрыва, параметры которых необходимы при разработке технических решений и рекомендаций по проведению операций гидравлического разрыва пласта (ГРП) для различных типов горных пород.

Генеральный директор, к.т.н. В.Н. Ульянов

ВНИМИ
VNIMI

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА –
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ВНИМИ
СИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ

Пр. Гагарина, 24, г. Прокопьевск, Кемеровская область, 653004, Россия
Телефон (3846) 66-77-33, факс (3846) 62-23-84
E-mail: vnimi@inbox.ru

Исх. от *05.10.2023г.* № *830*

СПРАВКА

Результаты диссертации Шевцовой Анны Александровны «Закономерности поведения трещины гидроразрыва горных пород, инициированной закачкой жидкостей с широким диапазоном геологических свойств», которые входят в основу «Методики лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей» приняты в СФ АО «ВНИМИ» и предполагаются к использованию на шахтах, отрабатывающих пласты угля с тяжелыми кровлями для разупрочнения их пород, а также для шахт разрабатывающих пласты опасные по выбросам угля и газа для их гидроразрыва с целью повышения эффективности дегазации.

Директор Е.А. Разумов

РУСВЭЛЛГРУП
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «ТВЭЛ»
Акционерное общество «РусВэллГруп»
(АО «РусВэллГруп»)

Каширское ш., д. 49, Москва, 115409
Телефон (495) 988-82-82, доб. 62-47
E-mail: info@ruswellgroup.ru
ОКПО 35308970, ОГРН 5187746032623
ИНН 7724462362, КПП 772401001

СПРАВКА

Настоящая справка подтверждает, что результаты диссертационной работы Шевцовой Анны Александровны «Закономерности поведения трещины гидроразрыва горных пород, инициированной закачкой жидкостей с широким диапазоном реологических свойств» в виде «Методики лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей» переданы в АО «РусВэллГруп» и предполагаются к практическому использованию.

Предложенная методика будет использована при планировании и проведении лабораторных исследований трещин гидроразрыва, параметры которых необходимы при разработке технических решений и рекомендаций по проведению операций гидравлического разрыва пласта (ГРП) для различных типов горных пород.

«26» 09 2023 г.

Заместитель
генерального директора по
научно-технической
деятельности А.Ю. Ломухин

А. А. Шевцова

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА, ИНИЦИИРОВАННОЙ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИХ ВЯЗКОСТЕЙ

ГОРНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ № 7 СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК 8

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»
2023

УДК 622.276.66
Ш37

Шевцова А. А.

Ш37 Методика лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. — № 7 (специальный выпуск 8). — 20 с. — М.: Издательство «Горная книга».

ISSN 0236-1493

Представлены результаты лабораторного исследования параметров трещины гидроразрыва и их особенностей в зависимости от вязкости закачиваемой жидкости. Покостовский гранит был выбран ввиду однородности и низкой проницаемости, что исключит влияние природных неоднородностей и утечек жидкости на поведение трещины гидроразрыва. Для изучения особенностей трещины гидроразрыва сотрудниками лаборатории центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий была разработана специальная экспериментальная методика. Параметры трещины гидроразрыва регистрировались тремя независимыми системами мониторинга. Сочетание нескольких независимых лабораторных методов позволяет надежно определить параметры, которые могут быть использованы для валидации моделей ГРП. Существующие теоретические модели распространения гидравлического разрыва пласта (ГРП) имеют ряд ограничений при прогнозировании влияния жидкостей ГРП на свойства пласта. Установлено, что вязкость жидкости ГРП влияет на такие параметры, как раскрытие трещины, скорость распространения и извилистость трещины ГРП. Полученные зависимости могут быть учтены при моделировании распространения трещины гидроразрыва, что может повысить эффективность полевых операций ГРП. Таким образом, лабораторные эксперименты можно рассматривать как разумную альтернативу испытаниям новых жидкостей, поскольку они позволяют получить исчерпывающую информацию о свойствах создаваемых трещин до применения новой технологии ГРП в полевых условиях.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, распространение трещины гидроразрыва, динамика роста трещины, извилистость трещины, акустическая эмиссия, жидкости гидроразрыва, реология жидкости гидроразрыва.

УДК 622.276.66

ISSN 0236-1493

© А. А. Шевцова, 2023
© Издательство «Горная книга», 2023
© Дизайн книги. Издательство «Горная книга», 2023

Введение

Гидравлический разрыв пласта является одним из наиболее эффективных способов создания сети трещин и улучшения проницаемости пласта. В настоящее время эта методика широко используется в различных областях. Например, применение гидроразрыва пласта позволяет получить экономически продуктивное количество энергии в улучшенной геотермальной системе [Lin и др., 2019]. Гидроразрыв также может увеличить продуктивность углеводородов для различных нетрадиционных типов горных пород [Suppachoknirun, Tutuncu, 2017]. Основным агентом, инициирующим трещину ГРП, является жидкость. Тем не менее, состав закачиваемого флюида может существенно влиять на свойства водочувствительных коллекторов, особенно с высоким содержанием глин [Mojid и др., 2021]. К сожалению, существующие теоретические модели распространения ГРП имеют некоторые ограничения в отношении прогнозирования влияния флюидов на свойства коллектора. Таким образом, лабораторные эксперименты являются разумной альтернативой, которая могла бы дать исчерпывающую информацию о динамике и свойствах создаваемых ГРП до промыслового применения того или иного метода ГРП [Turuntaev и др., 2021].

Важно отметить, что каждый нетрадиционный пласт уникален и имеет свои свойства, состав и пластовое давление, что требует индивидуального проектирования процедуры ГРП. Например, технология многостадийного ГРП, широко применяемая при разработке американской формации Баккен, не применима для Баженовской формации [Bukharov и др., 2020] в связи с тем, что жидкости на водной основе могут вызвать ряд негативных последствий, таких как закупорка порового пространства, дестабилизация глины и образование эмульсии, изменение смачиваемости. Эти явления считаются типичными для традиционных пластов, однако для пород Баженовской свиты они могут оказаться критичными из-за крайне низкой проницаемости [Bukharov и др., 2020].

За последнее десятилетие было разработано большое количество разнообразных жидкостей для ГРП. Наиболее распространенными жидкостями для ГРП являются жидкости на водной основе, напри-

Для цитирования: *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). — С. 3–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_8_3.

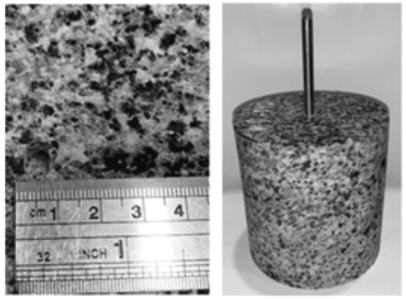
© А. А. Шевцова, 2023

мер, slickwater, а также гелевые и полимерные жидкости, что обусловлено их низкой ценой и простотой изготовления [Magadova, Silin, Gluschenko, 2012; Silin и др., 2022; Silin и др., 2020]. Для успешного и эффективного проведения ГРП выбор жидкости основывается на следующих ключевых параметрах: совместимость закачиваемой жидкости с породами и флюидами целевого пласта, способность создавать давление жидкости, достаточное для образования хорошо связанной сети трещин (ГРП), а также легкость удаления рабочей жидкости после проведения ГРП [Barati, Liang, 2014].

В данном исследовании были изучены динамика инициированной трещины гидроразрыва, а также основные параметры трещины и извилистость. В ходе экспериментов было установлено, что вязкость жидкости ГРП влияет на ряд параметров образовавшихся трещин: раскрытие, скорость роста и извилистость. Полученные корреляции могут быть учтены при моделировании ГРП, что может повысить эффективность ГРП на месторождении.

Материалы и методы

В данном исследовании для экспериментов гидроразрыва была подобрана однородная, низкопроницаемая горная порода — гранит. Покостовский гранит представляет собой однородную светло-серую магматическую породу со среднезернистой структурой (рис. 1, *а*). В некоторых частях данной магматической породы могут присутствовать шлиры до 50–60 мм в размере. Минеральный состав гранита определялся с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) и представляет собой: кварц — 42,9%, олигоклаз — 31,8%, микроклин — 20%, биотит — 5,3%.



а *б*

Рис. 1. Внешний вид поперечного среза Покостовского гранита (а) и подготовленного к эксперименту цилиндрического образца (б)

Перед целевыми испытаниями гидроразрыва были проведены стандартные геомеханические испытания и получены деформационно-прочностные свойства магматических горных пород: модуль Юнга (E), коэффициент Пуассона (ν), предел прочности при многостадийном трехосном сжатии ($\sigma_{сж}$), предел прочности при одноосном растяжении ($\sigma_р$) (Бразильский тест), угол внутреннего трения (φ), сцепление (C), перечисленные в табл. 1. Кроме того, перед испытаниями были измерены пористость (n) и проницаемость (k) гранитов по азоту.

Таблица 1

Характеристики магматической горной породы (Покостовкого гранита)

***E*, ГПа**	**$\sigma_{сж}$, МПа**	**$\sigma_р$, МПа**	***n*, %**	***k*, нД**	**ν**	**φ, °**	***C*, МПа**
68.79	364.20	7.20	1.22	656.40	0.22	44.2	28.00

На рис. 1, *б* представлен внешний вид цилиндрического образца с вклеенной трубкой, имитирующей скважину. В табл. 2 приведены размеры цилиндрических образцов (диаметр (*d*), длина (*l*)) и плотность (ρ).

Таблица 2

Геометрические размеры цилиндрических образцов

№ образца	***l*, мм**	***d*, мм**	**m, г**	**ρ, г/см³**
WG-716	108.24	99.31	2288.44	2.73
WG-717	108.88	99.26	2299.70	2.73
WG-722	110.84	99.61	2355.62	2.73
WG-721	109.10	99.43	2304.35	2.72

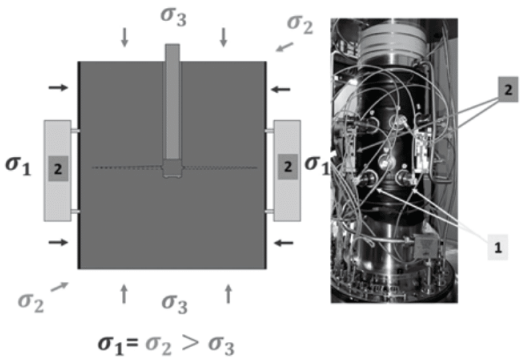
В данном исследовании использовались неньютоновские жидкости гидроразрыва, с широким диапазоном вязкости: бесполимерная жидкость НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ, жидкость на основе синтетического полимера Полигель, маловязкая дизельная система 2 (ДС-2) и вязкая дизельная система 3 (ДС-3) на основе дизельного топлива. Данные жидкости гидроразрыва были разработаны сотрудниками кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина» и используются в полевых операциях ГРП. Значения динамической вязкости жидкостей, использованных для инициации трещины гидроразрыва, были измерены при 100 $с^{-1}$ (μ_1) и при 300 $с^{-1}$ (μ_2) и представлены в табл. 3. Скорость закачки жидкостей гидроразрыва в образцы была постоянной и равнялась 5 мл/мин.

Таблица 3

Свойства жидкостей гидроразрыва

Название	μ_1, мПа·с	μ_2, мПа·с	№ образца
НЕФТЕНОЛ-ВУПАВ	81	50	WG-716
Полигель	95	55	WG-717
ДС-2	102	36	WG-722
ДС-3	1220	311	WG-721

Эксперименты гидроразрыва проводились в псевдо-трехосных условиях, при которых два из трех главных напряжения равны между собой. Минимальное главное напряжение создавалась в осевом (вертикальном) направлении, что позволило ориентировать трещину гидроразрыва в горизонтальном направлении (рис. 2, *а*).



а *б*

Рис. 2. Схема нагружения образца во время эксперимента (а) и подготовленный к испытанию гранитный образец с наклеенными на цилиндрическую поверхность датчиками АЭ (1) и установленным деформометром (2) (б)

Параметры трещины гидроразрыва регистрировались тремя независимыми системами наблюдений: 1) датчиками акустической эмиссии, наклеенными непосредственно на цилиндрическую поверхность образца; 2) осевым деформометром, который измеряет осевую деформацию образца, вызванную раскрытием трещины гидроразрыва; 3) датчиками давления и объема закачиваемой жидкости гидроразрыва. Кроме того, деформометр состоит из двух экстензометров (Ext_A, Ext_B), установленных диаметрально противоположно на боковой поверхности

цилиндрических образцов и измеряющих осевую деформацию образца независимо друг от друга. В дополнение к деформометру, независимо оценить осевую деформацию образца можно по перемещению осевого поршня, которое вызвано раскрытием трещины гидроразрыва. На рис. 2б приведена фотография цилиндрического образца, установленного в камеру нагружающей установки и готового к эксперименту. Подробное описание специальной экспериментальной методики и независимых систем мониторинга приведено в [Bobrova и др., 2021; Shevtsova и др., 2022; Shevtsova и др., 2023].

Результаты

В данном разделе приведены результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва, выполненных на четырех цилиндрических образцах (рис.3 — рис.6). Для каждого из них был получен следующий набор параметров, зарегистрированных независимыми системами наблюдения: 1) Давление жидкости гидроразрыва в стволе скважины, 2) общее количество событий АЭ, 3) осевая (вертикальная) деформация образца, вызванная раскрытием трещины гидроразрыва, 4) объем жидкости, закачанной в трещину (подробное объяснение расчета параметра приведено в [Bobrova и др., 2021; Shevtsova и др., 2023]), 5) скорость роста трещины гидроразрыва (подробное объяснение расчета параметра приведено в [Shevtsova и др., 2022]).

Сравнение параметров трещины гидроразрыва для цилиндрических образцов производится попарно для рис. 3 — рис. 4 и рис. 5 — рис. 6: графики (а) демонстрируют давление жидкости гидроразрыва и общее количество событий акустической эмиссии (АЭ); графики (б) демонстрируют осевую деформацию образца, вызванную раскрытием трещины гидроразрыва, зарегистрированную независимыми датчиками перемещения поршня и экстензометрами; графики (в) демонстрируют объем жидкости, закачанный в трещину гидроразрыва, который был расчитан по методике, описанной в [Bobrova и др., 2021; Shevtsova и др., 2022]; графики (г)) демонстрируют скорость распространения трещины гидроразрыва.

Сравнивая параметры трещины гидроразрыва в паре образцов, показанных на рис. 3 и рис. 4, в эксперименте с закачкой более вязкой жидкости на основе синтетического полимера Полигель (рис. 4), можно заметить, что были зарегистрированы: большее значение давления гидроразрыва (пиковое значение кривой давления жидкости), большее раскрытие трещины, больший интервал времени от инициации трещины до регистрации давления гидроразрыва и меньшая скорость роста трещины. Данные результаты, соответствуют полученным ранее закономерностям [Shevtsova и др., 2022; Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015].

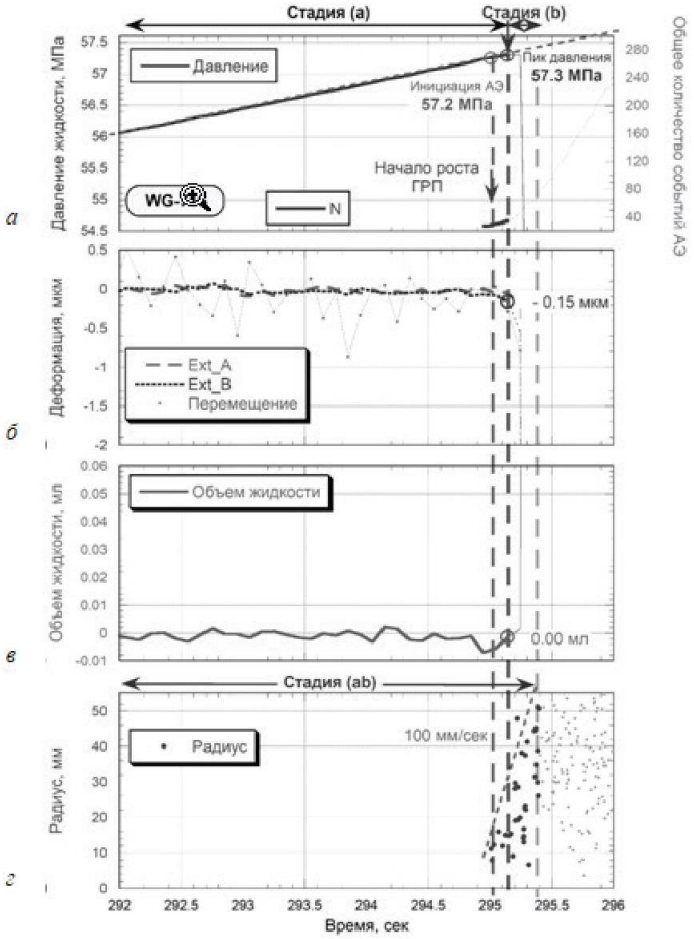


Рис. 3. Образец WG-716: давление закачанной жидкости гидроразрыва и общее количество залоцированных сигналов АЭ (а), осевые деформации, измеренные левым (Ext_B) и правым (Ext_A) экстензометрами, и кривая, показывающая перемещение нагрузочного поршня (осевая деформация образца) (б), объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (в); распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности (г) в зависимости от времени эксперимента

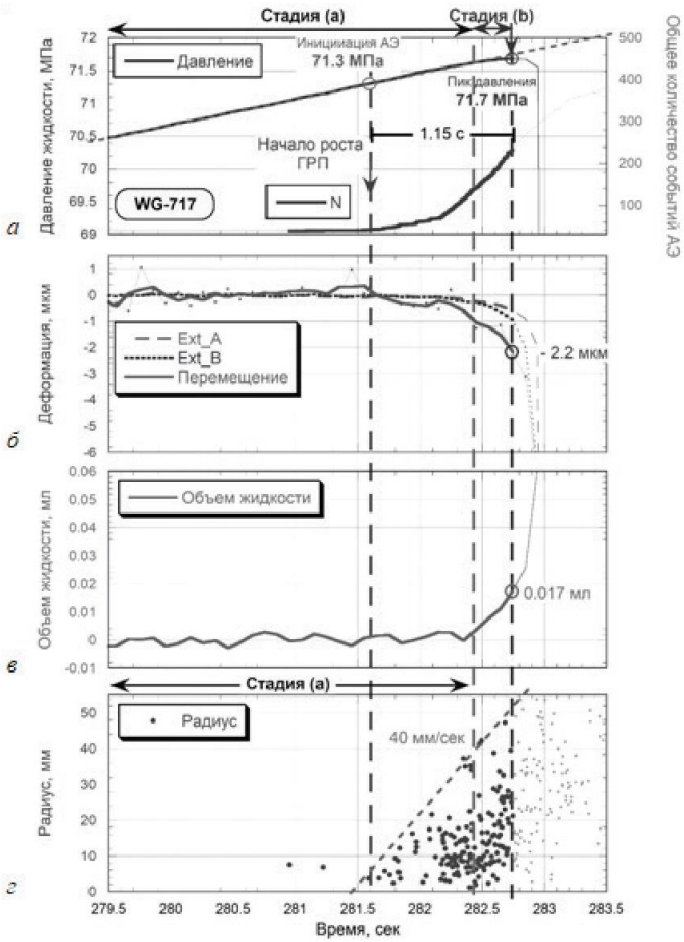


Рис. 4. Образец WG-717: давление закачанной жидкости гидроразрыва и общее количество залоцированных сигналов АЭ (а), осевые деформации, измеренные левым (Ext_B) и правым (Ext_A) экстензометрами, и кривая, показывающая перемещение нагрузочного поршня (осевая деформация образца) (б), объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (в); распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности (г) в зависимости от времени эксперимента

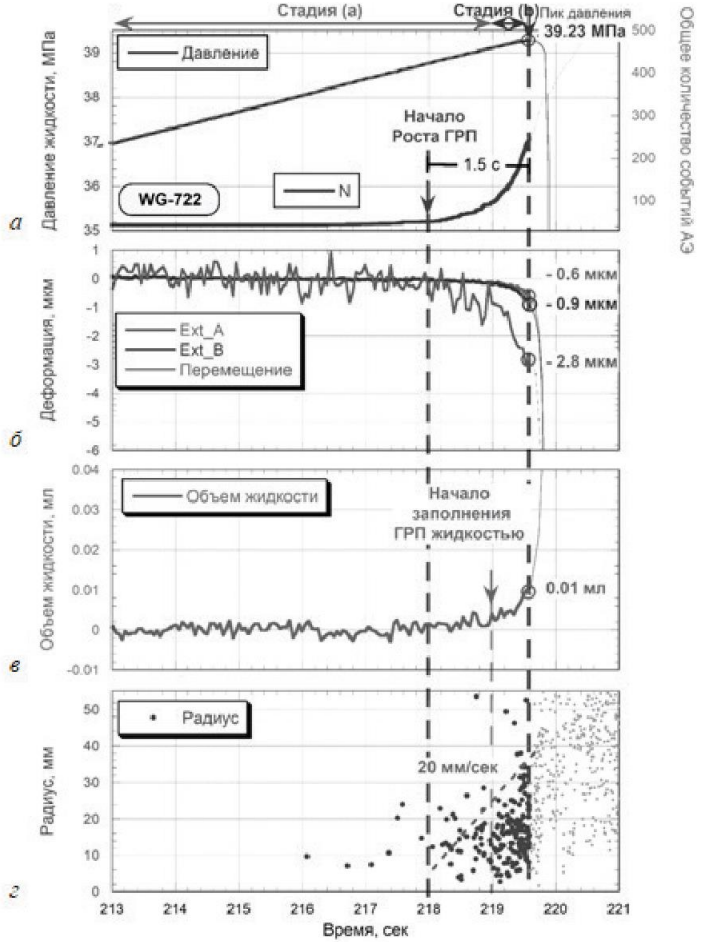


Рис. 5. Образец WG-722: *давление закачанной жидкости гидроразрыва и общее количество залоцированных сигналов АЭ (а), осевые деформации, измеренные левым (Ext_B) и правым (Ext_A) экстензометрами и кривая, показывающая перемещение нагрузочного поршня (осевая деформация образца) (б), объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (в); распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности (г) в зависимости от времени эксперимента*

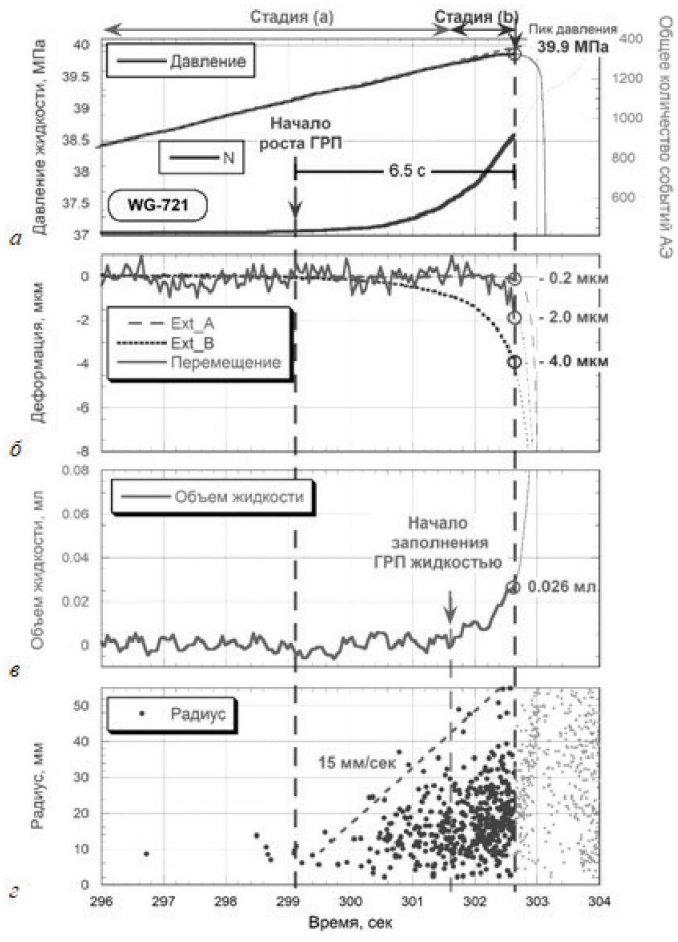


Рис. 6. Образец WG-721: давление закачанной жидкости гидроразрыва и общее количество залоцированных сигналов АЭ (а), осевые деформации, измеренные левым (Ext_B) и правым (Ext_A) экстензометрами и кривая, показывающая перемещение нагрузочного поршня (осевая деформация образца) (б), объем жидкости, закачанной в трещину гидроразрыва (в); распределение залоцированных сигналов АЭ от центра образца к поверхности (г) в зависимости от времени эксперимента

Сравнивая параметры трещины гидроразрыва в паре образцов, показанных на рис. 5 и рис. 6, , можно заметить, что в эксперименте с закачкой вязкого ДС-3 (рис.6) были зарегистрированы: большее значение давления гидроразрыва (пиковое значение кривой давления жидкости), значительно большее раскрытие трещины в момент регистрации максимального давления жидкости в стволе скважины, значительно больший интервал времени от инициации трещины до регистрации давления гидроразрыва и меньшая скорость роста трещины. Данные результаты, соответствуют полученным ранее закономерностям [Shevtsova и др., 2022; Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015].

Рис. 7 демонстрирует фотографии гранитных образцов после испытания. На фотографиях можно рассмотреть инициированную горизонтальную трещину гидроразрыва.

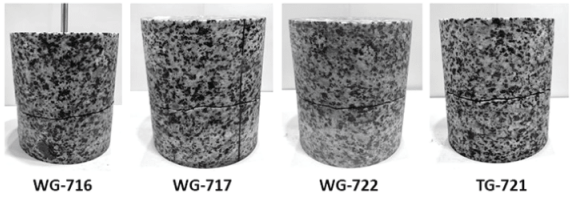


Рис. 7. Фотографии образцов после испытания

Обсуждение результатов

Параметры трещины гидроразрыва, инициированной в четырех образцах гранита, приведены в табл. 4. Выбранные магматические горные породы являются однородными и низкопроницаемыми, что исключает влияние неоднородностей и утечки на параметры трещины гидроразрыва. Эффективное давление гидроразрыва рассчитывается как разность давления гидроразрыва P_b (максимальное значение) и минимального главного напряжения σ_3. Извилистость определяется как общая длина траектории трещины, деленная на длину прямой, соединяющей начальную и конечную точки траектории трещины. Для данных образцов значения извилистости варьируют в диапазоне 1.33–1.47.

Зависимости, полученные в данных экспериментах (рис. 8), демонстрируют следующее: 1) большее раскрытие трещины гидроразрыва наблюдается при закачке более вязкой жидкости; 2) меньшая скорость роста трещины наблюдалась при закачке высоковязкой жидкости; 3) меньшая извилистость трещины гидроразрыва возникает при закачке высоковязкой жидкости. Полученные результаты согласуются с полученными ранее корреляциями [Shevtsova и др., 2022; Stanchits, Burghardt, Surdi, 2015].

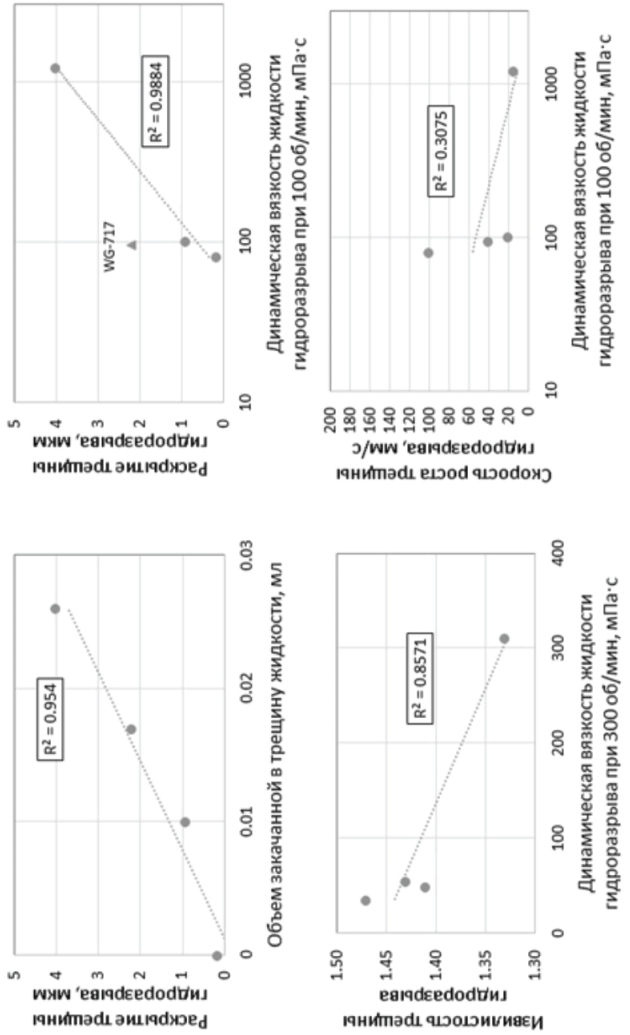


Рис. 8. Корреляции параметров трещины гидроразрыва с динамической вязкостью закачанной жидкости

Таблица 4

Основные результаты лабораторных экспериментов гидроразрыва

№ образца	Давление ГРП, МПа	Эфф. давление ГРП, МПа	Раскрытие трещины, мкм	Объем жидкости, мл	Скорость роста трещины, мм/с	Интервал времени от инициации АЭ до регистрации давления ГРП, с
WG-716	57.3	34.3	0.15	0	100	0.15
WG-717	71.7	48.7	2.20	0.017	40	1.15
WG-722	39.2	31.2	0.90	0.010	20	1.50
WG-721	39.9	31.9	4.00	0.026	15	3.50

Кроме того, в данном исследовании было показано, что раскрытие трещины гидроразрыва зависит от объема жидкости, поступившей в трещину. В образце WG-717 было зарегистрировано значительное раскрытие трещины, которое несколько выбивается из тренда, потому как закачанный в образец Полигель демонстрирует поведение высоковязкой жидкости.

Заключение

1. Разработанная в лаборатории центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий специальная экспериментальная методика проведения экспериментов гидроразрыва в лабораторных условиях с непрерывным мониторингом роста трещины гидроразрыва тремя независимыми системами наблюдения (высокочувствительные пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии, которые были специально сконструированы и изготовлены для регистрации сигналов в условиях высокого бокового (обжимного) давления; деформометры; датчики давления и объема жидкости гидроразрыва) позволяет проводить прямые измерения параметров трещины гидроразрыва в целевых породах и комплексный анализ динамики её распространения.

2. Увеличение вязкости жидкости, инициирующей трещину гидроразрыва, приводит к увеличению раскрытия трещины и уменьшению скорости распространения трещины. Данная зависимость была получена на цилиндрических образцах горных пород, ранее не исследованных с целью инициации трещины гидроразрыва, в условиях псевдотрехосного нагружения в диапазоне вязкостей жидкостей гидроразрыва 81 мПа·с — 1220 мПа·с.

3. Увеличение вязкости жидкости, инициирующей трещину гидроразрыва, способствует уменьшению извилистости трещины гидроразрыва. Совместно с бóльшим раскрытием, полученная геометрия трещины является наиболее благоприятной для эффективной доставки и распределения проппанта, обеспечивающего долгосрочное раскрытие трещины гидроразрыва.

Финансирование

Данное исследование было выполнено в лаборатории центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по договору № 075–10–2022–011 в рамках программы развития исследовательского центра мирового уровня.

Автор выражает признательность за помощь в планировании, организации и проведении экспериментов сотрудникам лаборатории центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий: В. И. Стукачеву, Н. В. Липатову, В. А. Эфстадиу, Е. А. Филеву, М. А. Бобровой и старшему научному сотруднику ИФЗ РАН им. О. Ю. Шмидта С. А. Станчицу. Также автор выражает благодарность за предоставленные для лабораторных экспериментов жидкости гидроразрыва сотрудникам кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина» С. А. Бородину и профессору Л. А. Магадовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barati R., Liang J.-T.* A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells // J. Appl. Polym. Sci. 2014. Т. 131. № 16.

2. *Bobrova M. и др.* Laboratory Investigation of Hydraulic Fracture Behavior of Unconventional Reservoir Rocks // Geosci. 2021. Т. 11. № 7.

3. *Bukharov D. F. и др.* Potential and Possible Technological Solutions for Field Development of Unconventional Reservoirs: Bazhenov Formation // SPE Russ. Pet. Technol. Conf. 2020.

4. *Lin C. и др.* Propagation characteristics and aperture evolution of hydraulic fractures in heterogeneous granite cores // Arab. J. Geosci. 2019. Т. 12. № 22. С. 684.

5. *Магадова Л. А., Силин М. А., Глущенко В. Н.* Нефтепромысловая химия. Технологические аспекты и материалы для гидроразрыва пласта: учеб. пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2012. 423 с.

6. *Mojid M. R. и др.* A state — of — art review on waterless gas shale fracturing technologies // J. Pet. Sci. Eng. 2021. Т. 196. С. 108048.

7. *Shevtsova A. и др.* Laboratory Study of the Influence of Fluid Rheology on the Characteristics of Created Hydraulic Fracture // Energies. 2022. Т. 15. № 11.

8. *Shevtsova A. и др.* Assessment of Saturation Effect on Hydraulic Fracturing in Sandstone and Thermally Treated Granite // Minerals. 2023. Т. 13. № 6.

9. *Silin M. и др.* Applicability Assessment of Viscoelastic Surfactants and Synthetic Polymers as a Base of Hydraulic Fracturing Fluids // Energies. 2022. Т. 15. № 8.

10. *Силин М. А. и др.* Разработка вязкоупругой композиции на основе поверхностно-активных веществ для гидравлического разрыва пласта // Труды

А. А. Шевцова

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА, ИНИЦИИРОВАННОЙ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИХ ВЯЗКОСТЕЙ

Горный информационно-аналитический
бюллетень (научно-технический журнал) № 7
(специальный выпуск 8)

Режим выпуска «стандартный»

Выпущено в авторской редакции

Компьютерная верстка и подготовка
оригинал-макета *И. А. Вершинина*
Обложка *И. А. Вершинина*

Подписано в печать 10.06.2023.
Формат 60x90/16.
Бумага офсетная № 1.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 500 экз. Изд. № ##.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»

Отпечатано в типографии
издательства «Горная книга»

ISSN 0236-1493

119049 Москва, Ленинский проспект, 6,
издательство «Горная книга»
тел. (499) 236-15-01; (495) 737-32-64