



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Института горного дела  
имени Н. А. Чинакала СО РАН, к.т.н.

А.П. Хмелинин

«21» ноября 2023 г.

### **Отзыв ведущей организации**

на диссертацию Шевцовой Анны Александровны

«Закономерности поведения трещины гидроразрыва горных пород, инициированной закачкой жидкостей с широким диапазоном реологических свойств», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

**Актуальность** диссертационного исследования определяется широким распространением технологий гидроразрыва для добычи углеводородов, использования геотермальных энергетических ресурсов, снижения концентрации метана в угольных пластах и его добычи, разупрочнения горных пород и измерения горного давления. В последнее десятилетие отмечается, что доступные и широко применяемые жидкости гидроразрыва на водной основе оказывают 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 и др. Это приводит к необходимости совершенствования технических характеристик жидкостей для инициации трещин гидроразрыва. Один из существенных вопросов технологий гидроразрыва является вопрос о влиянии свойств жидкости разрыва на характер формируемой трещины, в первую очередь – вопрос о влиянии вязкости жидкости.

В конце 1980-х годов в работах Чернова О.И. и Кю Н.Г. (ИГД СО РАН) экспериментально на образцах из оргстекла было отмечено сильное влияние вязкости жидкости разрыва на характер развития трещины. При малой вязкости трещина в условиях осесимметричного нагружения от симметричного концентратора развивается несимметрично и ее геометрический центр может значительно смещаться. При использовании в качестве внедряющегося агента пластилина форма трещины становится симметричной.

Очевидно, что апробация и усовершенствование технологий гидроразрыва в пластовых условиях является весьма дорогостоящей процедурой. В то же время, в лабораторных условиях инициация трещин гидроразрыва на образцах реальных пластов позволяет подобрать оптимальную жидкость гидроразрыва и условия ее закачки, произвести прямые измерения раскрытия трещины, проанализировать поверхность стенок трещины гидроразрыва и т.д. С этой точки

зрения, лабораторные эксперименты можно рассматривать как разумную альтернативу для тестирования новых жидкостей разрыва.

На основании изложенного можно заключить, что тематика диссертационного исследования Шевцовой А.А., связанная с исследованием влияния реологических свойств жидкости разрыва на характер формируемых трещин гидроразрыва, является актуальной.

Диссертационная работа Шевцовой А.А. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 185 наименований. Общий объем работы – 178 страниц машинописного текста.

В первой главе приведен достаточно полный обзор научных публикаций по вопросам применяемых технологий гидроразрыва и используемых в этих технологиях жидкостях разрыва. Отмечается, что несмотря на широкое использование технологий гидроразрыва в современной практике, экспериментальные исследования для выявления особенностей роста трещин гидроразрыва в целевых породах коллектора и выявления зависимостей параметров трещины от реологических свойств нагнетаемой жидкости в настоящее время изучены недостаточно. По результатам обзора делается вывод о целесообразности проведения подобных исследований в лабораторных условиях.

Во второй главе приведено описание используемого лабораторного оборудования, а также методик проведения экспериментов и характеристик испытываемых образцов и нагнетаемых жидкостей разрыва. Приводится обоснование выбора исследуемых горных пород. Диапазон реологических свойств жидкостей, инициирующих трещину гидроразрыва, обеспечивается вариацией их вязкости в диапазоне 0.1 – 100 000 Па\*с.

Третья глава посвящена описанию результатов лабораторных экспериментов по формированию трещин гидроразрыва в цилиндрических образцах магматических пород (Покостовский гранит, Ташмурунский гранит, трещиноватый Ташмурунский гранит). Дана подробная характеристика влияния реологии нагнетаемых жидкостей на параметры и динамику формируемых трещин.

В процессе экспериментов фиксировались давление и объем закаченной жидкости разрыва, удлинение образца в поперечном к трещине направлении, амплитуды сигналов акустической эмиссии, их местоположение. После проведения гидроразрыва исследовалась структура берегов трещины, их шероховатость и извилистость.

В результате экспериментов установлена взаимосвязь между вязкостью агента гидроразрыва и извилистостью формируемой трещины. Показано, что закачка маловязких жидкостей индуцирует трещины гидроразрыва с большей

извилистостью поверхности, что в масштабах резервуара может воплощаться в геометрически сложную сеть трещин.

В четвертой главе приведены результаты лабораторных экспериментов распространения трещины гидроразрыва, инициированной в кубических образцах Ташмурунского гранита (25см × 25см), в условиях трехосного сжатия. Проведен анализ полученных результатов измерений с целью выяснения влияния вязкости жидкости разрыва на параметры процесса гидроразрыва. Сопоставление результатов экспериментов, полученных на цилиндрических образцах диаметром 10см и на кубических образцах с длиной грани 25см, демонстрирует соответствие линейных зависимостей между параметрами трещины (эффективное давление гидроразрыва, раскрытие трещины, скорость роста трещины) и вязкостью закачиваемого агента.

В пятой главе приводятся результаты экспериментов по распространению трещин при гидроразрыве в цилиндрических образцах осадочных пород (сланцы, песчаники). При этом исследовалось влияние слоистости пород и их насыщенности флюидом на параметры процесса гидроразрыва.

#### **Достоверность научных результатов подтверждается:**

- использованием современной апробированной высокоточной регистрирующей аппаратуры, цифровых пакетов обработки данных;
- сравнением полученных результатов с данными других авторов, которое показывают их согласие;
- комплексным проведением исследований, связанным с единовременной регистрацией большого числа параметров развития трещины гидроразрыва;
- применением апробированных статистических методов обработки экспериментальных данных.

#### **Главными достижениями автора являются следующие результаты**

1. В распоряжении диссертанта был набор высокоточной измерительной техники, такие как сервогидравлический пресс MTS 815/S ATM и трехосный пресс компании «ООО Геологика», система акустического мониторинга Richter, акустические датчики Сколтеха. Считаю, что заслуга соискателя заключается в овладении навыками работы с этой техникой и в разработке на ее основе методики проведения испытаний по определению влияния вязкости жидкости разрыва на характер гидроразрыва.

2. В результате проведения испытаний был определен характер искомых зависимостей. Показано, что с увеличением вязкости жидкости разрыва увеличивается среднее статистическое раскрытие трещины, объем закаченной жидкости, эффективное давление разрыва, уменьшается скорость развития трещины разрыва. Полученные зависимости имеют большой статистический разброс, определяемый, по-видимому, отличием структуры образцов, их изменчивостью, характерной для горных пород. При таком разбросе

достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом проведенных соискателем экспериментов.

3. Интересные данные получены в результате использования системы мониторинга сигналов акустической эмиссии (АЭ), наблюдающейся в образцах горной породы в процессе гидроразрыва. Использование высокочастотных датчиков и регистрирующей аппаратуры позволило выявлять отдельные сигналы акустической эмиссии, определять координаты их источника, время его срабатывания и энергетические параметры. Предполагается, что картины распределения таких источников в образце в текущий момент времени согласуются с формой трещины, что позволяет, например, оценивать скорость продвижения фронта трещины. Такое предположение убедительно подтверждается картинами расположения источников эмиссии в зависимости от времени, зарегистрированных в экспериментах с максимально вязкими жидкостями ПМС-10000 и ПМС-100000. На рисунке 113, иллюстрирующем результаты этих экспериментов, видна хорошая корреляция расположения источников АЭ с предполагаемым фронтом развивающейся трещины.

#### **Новизна и научная значимость**

Научная значимость и новизна проведенного автором диссертационного исследования заключается в установлении полученных взаимосвязей между параметрами трещины гидроразрыва и вязкостью жидкости, инициирующей эту трещину, для исследованных горных пород на разных масштабных уровнях в условиях трехосного сжатия при использовании жидкостей в широком диапазоне вязкостей 0.1 - 100 000 Па\*с.

#### **Практическая значимость**

Полученные данные о влиянии вязкости жидкости, применяемой при гидроразрыве, на его параметры, такие, как эффективное давление разрыва, объем закаченной жидкости, скорость развития трещины в процессе ее развития, имеют важное значение при проектировании гидроразрывов пластов. Полученные с хорошей точностью экспериментальные данные по динамике процесса гидроразрыва могут использоваться для разработки и верификации расчетных моделей гидроразрыва с учетом реологических свойств жидкости разрыва и параметров пород.

Предложенная автором методика может быть рекомендована к использованию в следующих организациях: АО «РусВэллГрупп», ООО «Новосибирский Научно-технический Центр», Сибирский филиал АО «ВНИМИ», ООО «Сибирский институт геотехнических исследований», ООО «Геонавигационные технологии» при планировании и проведении лабораторных исследований трещин гидроразрыва, параметры которых необходимы при разработке технических решений и рекомендаций по проведению операций гидравлического разрыва пласта для различных типов горных пород.

## **Публикации и апробация результатов работы**

Положения и результаты диссертационного исследования Шевцовой А.А. докладывались на международных конференциях (1) SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, October 2018; (2) EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020; (3) 1st International Scientific and Practical Conference «Modern Methods of Enhanced Oil Recovery for Conventional and Unconventional Reservoirs. November 29th – December 1st, 2021. Moscow, Russia.

Основные результаты исследования опубликованы в 4 научных статьях в рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

## **Замечания**

1. Обращая внимание на детальное описание фильтрационных и деформационно-прочностных свойств пород, используемых в экспериментах, следует отметить отсутствие данных о трещиностойкости этих пород, например, критических значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Такой параметр используется во многих теориях хрупкого разрушения и может быть определяющим в процессе гидроразрыва, его корреляция с регистрируемыми параметрами может быть значимой. Считаем, что в этом направлении соискатель может продолжить исследования.
2. Определение скорости развития трещин в экспериментах по картинам распределения источников акустической эмиссии требует дополнительного обоснования. Считаем этот способ исследования развития трещин перспективным. По нашему мнению, в будущем, для уточнения связи развития трещины и возникающей акустической эмиссии можно провести гидроразрыв в образцах их прозрачного материала, например, из оргстекла с одновременной видеосъемкой развития трещины и регистрацией акустической эмиссии.
3. Замечания по тексту.
  - На стр. 21 повтор слов «расширенных наведенных трещин».
  - Рис. 90б противоречит тексту на стр. 130: «...красная кривая показывает отсутствие дальнейшего раскрытия трещины гидроразрыва».
  - Рис. 112 противоречит тексту на стр.159: «3 мм/сек и 15 мм/сек в образцах GM5–101 и GM7–101».
  - Результаты фиксации акустических сигналов приводятся для стадий а, б, с, но не указываются временные границы этих стадий, и по графикам не всегда удается их идентифицировать, что затрудняет понимание результатов.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

## **Общее заключение по диссертации**

Диссертация Шевцовой А.А. представляет собой законченную научную квалификационную работу, выполненную на актуальную тематику на высоком научном уровне, в которой решена важная научная задача, имеющая значение для развития геомеханики. Выполненные работы и полученные результаты соответствуют пп. 3, 6, 9, 11 паспорта научной специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в научной печати, апробированы на конференциях и научных семинарах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Шевцовой Анны Александровны «Закономерности поведения трещины гидроразрыва горных пород, инициированной закачкой жидкостей с широким диапазоном реологических свойств» удовлетворяет всем требованиям п. 2 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Диссертация рассмотрена на совместном семинаре лаборатории механики взрыва и разрушения горных пород и лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород ФГБУН Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

И.о. заведующего, главный научный сотрудник лаборатории механики взрыва и разрушения горных пород ИГД СО РАН,  
доктор физ.-мат. наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела)

Шер Евгений Николаевич 

Заведующий лабораторией физических методов воздействия на массив горных пород ИГД СО РАН,  
доктор технических наук (25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика)

Сердюков Сергей Владимирович 

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук  
Почтовый адрес 630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, д.54  
Телефон +7 (383) 205-30-30  
e-mail: mailigd@misd.ru