

На правах рукописи



Жигульский Светлана Владимировна

**ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ РАСКРЫТОСТЬЮ И НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ТРЕЩИНЫ НА ПРИМЕРЕ
ТРЕЩИНОВАТОГО КОЛЛЕКТОРА НЕФТИ И ГАЗА**

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

На соискание ученой степени

Кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель:	Тихоцкий Сергей Андреевич Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга ИФЗ РАН;
Официальные оппоненты:	Рыжков Валерий Иванович Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разведочной геофизики и компьютерных систем ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»;
	Федоров Александр Игоревич Кандидат физико-математических наук, эксперт аналитического отдела ООО «РН-БашНИПНефть»
Ведущая организация:	АО «Институт геологии и разработки горючих ископаемых» (АО «ИГиРГИ»), г. Москва

Защита диссертации состоится **«08» сентября 2022 г. в 14:00** часов на заседании Диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Камзолкину Владимиру Анатольевичу.

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,

кандидат геолого-минералогических наук

В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Геомеханика в нефтегазовом деле является относительно новым направлением, импульс к развитию которого был задан новыми технологическими вызовами, стоящими перед нефтяной отраслью. Изменение ресурсной базы в сторону увеличения доли низкопроницаемых коллекторов в условиях меняющейся конъюнктуры привело к усложнению геолого-технических условий бурения, что явилось триггером развития геомеханического направления. В данном контексте геомеханика решает такую задачу как оценка устойчивости ствола скважины с последующим выбором оптимальной конструкции и удельного веса бурового раствора для обеспечения стабильности стенок скважины, и в то же время для предотвращения рисков, связанных с непреднамеренным разрывом горной породы, за которым следуют катастрофические поглощения бурового раствора. Наличие интервалов несовместимого бурения выдвигает определенные требования к конструкции ствола, которые должны быть превентивно проанализированы. Стоит отметить и важность геомеханической составляющей в выборе технологии ГРП (гидравлический разрыв пласта), которая позволяет осуществить переход от непромышленных коллекторов к промышленным для дальнейшего освоения. Роль геомеханики в данном направлении состоит в том, чтобы сформировать представление о том какая технология гидроразрыва будет максимально эффективной для разрабатываемого пласта. Знание механических свойств породы и напряженно-деформированного состояния позволяет определить благоприятные зоны для инициации трещины гидроразрыва, а также оценить геометрические параметры сформированной трещины. Отметим, что дальнейшая разработка пласта приводит к уменьшению пластового давления или же к локальному увеличению за счет системы поддержания пластового давления (ППД), что в свою очередь влечет за собой изменение напряженного состояния пласта. Прогноз напряженно-деформированного состояния на начальный (в отсутствие разработки) и на заданный период времени (с учетом разработки) позволяет оценить риски, связанные с автоГРП, преждевременными прорывами в добывающих скважинах, активацией разрывных нарушений. Геомеханика сопровождает весь цикл освоения месторождения, начиная с формирования программы геологоразведочных работ и завершая методами интенсификации добычи. В связи с этим геомеханическое направление является кросс-функциональным, так как консолидирует геолого-геофизическую информацию, данные о процессе бурения скважины (геолого-технологические исследования) и освоения (промыслово-геофизические исследования, информацию о работе скважины).

В нефтегазовом секторе часть запасов сосредоточена в трещинных коллекторах, которые характеризуются сложной структурой пустотного пространства. Текущие методы изучения естественной трещиноватости нацелены на исследование геометрических характеристик трещин, а также на оценку вклада трещин в получении притока пластового флюида в скважине. В отличие от порового типа коллектора проницаемость трещин может меняться в очень значительном диапазоне, что сказывается на дебит скважины. По мере изучения таких коллекторов стало очевидным, что не все трещины в пластовых условиях являются флюидопроводящими, что требует разработки усовершенствованных подходов к изучению проницаемости таких структурных объектов. Одним из признаков открытости системы трещин являются поглощения в процессе бурения. Бурение в трещиноватых породах довольно часто сопровождается потерями бурового раствора, полная потеря циркуляции приводит к невозможности дальнейшего бурения скважины без кальматации призабойной зоны. Помимо рисков, связанных с бурением, существует некоторая сложность в прогнозе зон флюидопроводимости естественных трещин, а также в оценке изменения проницаемости системы трещин в период разработки месторождения. В связи с этим представляется актуальным развитие методов геомеханического анализа флюидопроводимости трещин в трещинных коллекторах. Развитие этого направления позволяет углубить фундаментальное

понимание фильтрационных процессов в трещиноватых породах с учетом их напряженно-деформированного состояния.

В диссертационной работе предлагается несколько решений по изучению напряженного состояния трещинных коллекторов, которые позволяют увеличить эффективность бурения за счет снижения рисков поглощения бурового раствора и локализовать зоны повышенной флюидопродовимости трещин. Полученные в ходе диссертационного исследования результаты могут быть использованы для решения проблем освоения и разработки месторождений углеводородов, характеризующихся значительным вкладом естественных трещин в фильтрационно-емкостные свойства пород коллекторов. Учитывая, что такие месторождения все активнее вовлекаются в разработку, можно с уверенностью говорить о высокой актуальности выбранной темы и ценности, полученных результатов.

Целью диссертационной работы является исследование критически напряженного состояния системы трещин по различным критериям прочности с последующим формированием корреляций между данными о продуктивности скважин и геомеханическими параметрами трещин, а также - разработка метода оценки критически напряженного состояния и раскрытости системы трещин в околоскважинной зоне с применением методов геомеханического моделирования и результатов скважинных геофизических исследований при помощи пластового микросканера.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Проанализировать методы оценки критически напряженного состояния трещины по критерию сухого трения и по нелинейному критерию прочности трещины на сдвиг. Провести сопоставление результатов моделирования критически напряженного состояния трещины по указанным критериям и выявить ограничения применяемых моделей активации трещин.

2. Исследовать взаимосвязь между критически напряженным состоянием трещины и данными о флюидопродовимости естественных трещин по результатам интерпретации специальных геофизических исследований и информации о продуктивности скважины для подтверждения наличия связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами, необходимой для обоснования достижимости целей, поставленных в рамках исследования.

3. Рассмотреть условия применимости модели Бартона-Бандиса для оценки раскрытости трещины в трещинном коллекторе нефти и газа. Описать типы исследований, необходимые для определения основных параметров, входящих в модель. Провести анализ чувствительности модели к исходным данным и проверку результатов оценки раскрытости трещин численным моделированием.

4. Предложить подход к оценке напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне с последующим отображением результатов моделирования на изображение пластового микросканера для дальнейшей адаптации модели и увеличения прогнозирующей способности.

Научная новизна:

1. Разработанный подход по оценке напряженного состояния трещин в околоскважинном пространстве с последующим расчетом раскрытости и реализация возможности отображения результатов моделирования на данные пластового микросканера является новым подходом, который ранее не был реализован и не описывался в литературных источниках. Подход закреплён в рамках патента и свидетельства на программу для ЭВМ.

2. Результаты моделирования показали высокую сходимость с данными пластового микросканера, показано, что «видимая» область трещины на имиджере (контраст свойств трещины по отношению к свойствам вмещающей породы) характеризуется большей раскрытостью по модели Бартона-Бандиса; также данная область трещины является

критически напряженной. Тем самым впервые по результатам геофизических исследований с пластовым микросканером экспериментально подтверждена применимость модели Бартона-Бандиса к описанию раскрытия трещин в пластовых условиях – *in situ*.

3. Сформулированы основные ограничения и неопределенности, связанные с использованием той или иной модели критически напряженного состояния трещины и модели раскрытости Бартона-Бандиса. Предложены способы снижения неопределенностей за счет проведения экспериментальных исследований, а также численного моделирования.

4. На примере трещинного коллектора рифейского возраста впервые показано, что основное влияние на продуктивность скважины оказывает длина фрагмента ствола в зоне критически напряженных трещин, количество критически напряженных трещин и результирующее напряжение.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Основными параметрами, определяющими переход трещины в критически напряженное состояние при заданном напряженно-деформированном состоянии, являются: отношение прочности на сжатие материала стенки трещины (JCS) к эффективному нормальному напряжению и коэффициент шероховатости трещины (JRC). Чем выше коэффициент шероховатости трещины, тем большее отклонение наблюдается между пределом прочности, определяемым по линейному и нелинейному (Н. Бартона) критериям прочности трещины на сдвиг.

2. Наблюдается корреляция между коэффициентом продуктивности скважины и параметрами: результирующее напряжение, действующее на плоскость трещины, длина фрагмента ствола в зоне критически напряженных трещин и количество критически напряженных трещин, что подтверждает гипотезу о том, что критически напряженные трещины являются флюидопроводящими.

3. Модель Бартона-Бандиса может быть применена для оценки раскрытости трещин в трещинных коллекторах. Результаты численного моделирования, дают оценку раскрытия, согласующуюся с экспериментальными данными. Оценки раскрытия с использованием модели Бартона-Бандиса имеют высокую чувствительность к параметрам: коэффициент шероховатости трещины (JRC) и прочность на сжатие материала стенки трещины (JCS).

4. Разработанная методика позволяет прогнозировать области повышенной флюидопроводимости в околоскважинной зоне в процессе бурения и освоения. Различное давление внутри ствола скважины, создаваемое буровым раствором, будет определять переход трещины в критически напряженное состояние и изменение ее раскрытости.

Практическая значимость работы:

1. В работе показано, что критически напряженное состояние и раскрытость трещины в околоскважинной зоне зависит не только от величины и направления пластовых напряжений (по отношению к ориентации трещины), но и от ориентации ствола скважины. Предложена методика выбора забойного давления для обеспечения максимальной продуктивности скважины и плотности бурового раствора для снижения рисков поглощения при бурении в трещинном коллекторе нефти и газа.

2. Новый подход к оценке раскрытости трещины с последующим анализом и сопоставлением с исследованиями пластовых микросканеров может быть применен также и при решении обратной задачи, а именно для адаптации модели и определения характеристик трещины, входящих в модель Бартона-Бандиса.

3. Были получены корреляции между коэффициентом продуктивности скважины и геомеханическими параметрами трещин на примере трещинного коллектора. Это позволяет сделать вывод о том, что для прогноза зон, перспективных для бурения, в случае трещинных коллекторов, также следует учитывать геомеханическую оценку критически напряженного состояния и раскрытости трещин.

4. По результатам проведенного исследования был зарегистрирован один патент №2728039 (Способ (варианты) и система (варианты) определения траектории бурения скважины) и получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667371 (Программа для выбора оптимального забойного давления в процессе разработки и плотности бурового раствора в процессе бурения на основе расчета активности/проводимости плоскости разрыва (разлома или трещины)).

Личный вклад. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены соискателем лично. В частности, соискателем был выполнен обзор литературы, анализ существующих подходов к оценке напряженного состояния трещины, проведено сравнение различных критериев прочности трещины, отдельно рассмотрены критерий сухого трения и нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг, на примере трещинного коллектора нефти и газа продемонстрирована возможность применения анализа критически напряженного состояния трещины для последующей корреляции с данными о продуктивности скважины, также в совокупности рассматриваются различные свойства трещин в контексте определения интервалов повышенной флюидопроводимости пласта, разработан метод прогноза критически напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне и последующего сопоставления с данными пластового микросканера, проведено численное моделирование трещиноватого пласта для подтверждения ранее выполненных оценок раскрытости системы трещин по модели Бартона-Бандиса.

Апробация работы. По теме работы автором опубликовано 10 печатных работ, из которых две статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации, рекомендованных ВАК, и два расширенных тезиса, цитируемых в системе SCOPUS, получен один патент на изобретение и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Результаты работ представлены на: Российской нефтегазовой технической конференции SPE 15 – 17 октября 2018 г., г. Москва; Российской нефтегазовой технической конференции SPE 22 – 24 октября 2019 г., г. Москва; Международной конференции «Future Petroleum Engineers forum» 2019 г., г. Пекин; Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2019 г., г. Москва; ARMA 54th U.S. rock mechanics/geomechanics symposium, 2020 (online); Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2020 г., г. Москва.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 142 страницы, 76 рисунка, 10 таблиц, два приложения и список литературы из наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность своему научному руководителю доктору физ.-мат. наук Тихоцкому С.А. за поддержку и содержательные консультации. Отдельная благодарность за плодотворное сотрудничество и возможность реализации ряда идей в виде программного инструмента Гунькину А.В. (Санкт-Петербургский Горный университет), за кристаллизацию направления работ Овчаренко Ю.В. (ООО «Газпромнефть НТЦ»), за конструктивные беседы Дубине Н.В., (Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта), за советы: Лукину С.В., Базырову И.Ш., Чебышеву И.С. (ООО «Газпромнефть НТЦ»), Гарагашу И.А., Баяк И.О. (Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта), за возможность проведения ряда интересных исследований: Фокину И.В., Гизатуллину Д.М., Эфстадиу В.А. (Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта), за сотрудничество: Рыжикову П., Еремееву А., Максимову Д.А., Задворнову Д.А. (Шлюмберже). Автор также благодарит ООО «Газпромнефть НТЦ» и Керимову Э.Р. (ООО «Газпромнефть НТЦ») за возможность публикации результатов работ.

Особую благодарность за непрерывную поддержку и мотивацию автор выражает своим близким Жигульскому В.В., Жигульской Е.Я.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается вопрос об развитии геомеханического направления при освоении месторождений нефти и газа, показана актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель и описаны задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, отражена научная новизна и практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Критический обзор и анализ литературы. Приводятся основные определения, относящиеся к оценке напряженно-деформированного состояния трещины, последовательно рассматриваются подходы к оценке напряженного состояния трещины в двумерном случае с переходом к трехмерному напряженному состоянию. Под напряженным состоянием трещины понимается совокупность действующих касательного и эффективного нормального напряжений. Многочисленные экспериментальные исследования трещиноватых пород позволили выявить некоторые закономерности распределения напряжений, действующих на плоскость трещины. Первые выполненные исследования по данному направлению включали группу экспериментов по деформированию образцов различных горных пород в условиях бокового обжима, достигая очень высоких значений. Результаты исследований были формализованы в виде эмпирического закона хрупкого разрушения горных пород (закон Байерли) [Byerlee, 1978]. Было показано, что установленная связь между нормальным и касательным напряжением в момент возникновения хрупкого разрушения в породе, содержащей трещину (в выборке участвовали как сплошные образцы, так и образцы, в которых трещина была предварительно создана искусственно или ранее возникла при частичном разрушении образца), хорошо описывается законом Кулона-Мора.

Последующие исследования по данному направлению показали, что активация уже существующих трещин может описываться критерием сухого трения. Под критически напряженной трещиной обычно понимают такую трещину, которой соответствует точка на диаграмме Мора, расположенная выше критерия сухого трения [Дубиня, 2018]. Отмечено, что в случае больших глубин (т.е. больших давлений) для перехода трещины в критически напряженное состояние наиболее значимыми являются действующие на плоскости трещины напряжения, тогда как при более низких эффективных напряжениях большое значение также приобретает тип горной породы, которая содержит трещину и особенности поверхности контакта. Последнее обстоятельство было формализовано в виде другого эмпирического закона – нелинейного критерия прочности трещины на сдвиг (Н. Бартона). Таким образом, для оценки критически напряженного состояния трещины используются два критерия прочности: линейный критерий сухого трения (1) и нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг (2), по каждому из которых в работе проведено исследование условий их применимости.

Критерий сухого трения [Ребецкий и др., 2017, Barton et al., 1994]:

$$\tau = 0,6\sigma'_n \quad (1)$$

В данном критерии коэффициент сухого трения равен 0,6, но стоит отметить, что последующие исследования критически напряженного состояния трещины позволили сделать вывод о том, что коэффициент сухого трения может меняться в значимом диапазоне. В работе [Zoback and Kohli, 2013] приводятся диапазоны изменения угла трения по трещине, в среднем угол меняется в диапазоне от 15-20 градусов (что соответствует коэффициенту 0,3-0,35) до 45-50 градусов (коэффициент трения 1-1,2). На трение большое влияние оказывает наличие того или иного заполнителя, к примеру, глинистый заполнитель будет уменьшать трение по разрыву. Также влияние оказывает наличие флюида в трещине: для сухого контакта и для влажного контакта трение будет отличаться.

Нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг [Barton, 1973; Barton and Choubey, 1977] был получен по результатам проведения ряда испытаний в установке сдвига различных

образцов горных пород, содержащих трещину. Было исследовано влияние типа породы и морфологии контакта на поведение предельного сдвигового напряжения.

Нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг описывается формулой:

$$\tau = \sigma'_n * tg \left(JRC * lg \frac{JCS}{\sigma'_n} + \varphi_{ост} \right), \quad (2)$$

где σ'_n - эффективное нормальное напряжение, Мпа; τ - предельно касательное напряжение, Мпа; JRC - коэффициент шероховатости трещины, д.е.; JCS - прочность на сжатие материала стенки трещины, Мпа; $\varphi_{ост}$ - остаточный угол трения, градусы.

В обзоре литературы приводится подробное описание экспериментальных методов оценки параметров, входящих в (2). Наибольшей среди всех параметров неопределенностью характеризуются измерения коэффициента шероховатости трещины (JRC), который меняется в диапазоне от 0 до 20, чем выше данный коэффициент, тем более шероховатой является поверхность контакта. Существует совокупность методов, которые включают 2D профилирование и 3D сканирование, по результатам которых выявлены эмпирические зависимости между JRC и другими параметрами, которые характеризуют морфологию поверхности разрыва. Но несмотря на разнообразие существующих исследований, остается все же довольно высокая неопределенность в оценке данного параметра, учитывая в дополнении факт того, что шероховатость поверхности меняется в процессе перемещения бортов трещины. Что касается прочности на сжатие материала стенки трещины (JCS), то она принимается в большинстве случаев равной пределу прочности на одноосное сжатие (при условии того, что поверхность контакта не претерпевала выветривания или химического воздействия). Для оценки остаточного угла трения проводятся лабораторные исследования. Отбираются два-три цилиндрических образца керна разного размера, затем на установке по измерению угла скольжения фиксируется угол, при котором один цилиндр начинает перемещаться относительно поверхности другого.

В нефтегазовой геомеханике интерес к изучению напряженного состояния трещин сильно возрос после публикации работы [Barton et al., 1994], где описываются результаты исследования напряженного состояния трещинного коллектора в скважине. Для этого проводится оценка напряжений, действующих на плоскости трещин, посредством построения геомеханической модели. Далее результаты расчетов действующих напряжений (эффективного нормального и касательного) в комбинации с критерием сухого трения сопоставляются с данными промыслово-геофизических исследований. По результатам такого сравнения делается вывод о том, что большинство флюидопроводящих интервалов в коллекторе коррелирует с местами пересечения стволом скважины зоны критически напряженных трещин. Сейчас на данную тему существует ряд исследований как в лабораторных условиях, так и с использованием промысловых данных, к примеру [Augustine et al., 2017; Hackston and Rutter, 2016; Zoback and Lund Snee, 2018; Дубиня, 2022; Жигульский и др., 2018]. Стоит отметить, что тезис о том, что флюидопроводящие трещины всегда являются критически напряженными, имеет некоторые недостатки, как минимум он не применим к трещинам отрыва, которые могут быть флюидопроводящими, но не быть критически напряженными, что связано с низкой величиной действующего касательного напряжения. Также наличие критически напряженной трещиноватости в неколекторе не будет являться признаком флюидопроводимости.

В данной главе отдельное внимание уделено описанию напряженного состояния пласта, где рассказывается какие существуют методы оценки вертикального, минимального и максимального горизонтальных напряжений. Данное знание, в совокупности с данными об ориентации трещины, позволяют рассчитать напряженное состояние трещины. Рассмотрено напряженное состояние в околоскважинной зоне [Kirsch, 1898, Jaeger, Cook, 2007], что являлось предварительным исследованием необходимым для формирования подхода по

оценке критически напряженного состояния трещины в околоскважинной зоне. На начальном этапе была выдвинута гипотеза о том, что давление в стволе скважины влияет на переход трещины в критически напряженное состояние.

В последнем разделе данной главы раскрывается вопрос о возможности оценки механического раскрытия трещин на основе данных о напряженно-деформированном состоянии. По многочисленным исследованиям отечественных и зарубежных авторов возникновение раскрытости по трещине обусловлено деформациями сдвига, которые трещина может испытать [Barton et.al., 1985; Olsson, Barton, 2001]. Широкое распространение получила модель Бартона-Бандиса, в которой авторы ввели понятие механической раскрытости, зависящей от напряженно-деформированного состояния пласта и свойств трещины, таких как коэффициент шероховатости и прочность на сжатие стенок трещины. Для расчета механического раскрытия необходимо предварительно оценить: E_0 – начальное раскрытие, мм; ΔV_j – величину смыкания берегов трещины под действием эффективного нормального напряжения; E_d – величину раскрытия, обусловленную дилатансией, мм.

$$E = E_0 - \Delta V_j + E_d \quad (3)$$

Расчет начального раскрытия основан на знании коэффициента шероховатости - JRC , который меняется от 0 до 20 по классификации Бартона и определяется по результатам проведения лабораторных исследований, и предела прочности на одноосное сжатие – UCS и прочности материала стенки трещины – JCS .

$$E_0 = \frac{JRC}{5} * (0.2 * \frac{UCS}{JCS} - 0.1) \quad (4)$$

По формуле (4) можно сделать вывод о том, что с ростом JRC увеличивается начальное раскрытие. Как было описано выше, коэффициент шероховатости меняется от 0 до 20, если сделать допущение о том, что $UCS = JCS$, получаем диапазон изменения начального раскрытия [0.04-0.4] мм.

При испытании образца, в котором существует трещина, поверхности разрыва будут испытывать сжатие за счет действия нормального напряжения, это приведет к уменьшению начального раскрытия. Данное явление было изучено в работе [Bandis, 1980], в ряде экспериментов, в ходе которых получено 64 набора кривых смыкания трещин, каждая кривая описывает связь между эффективным нормальным напряжением (σ'_n) и величиной смыкания стенок трещины (ΔV_j).

$$\Delta V_j = \frac{\sigma'_n C_m}{K_{ni} C_m + \sigma'_n}, \quad (5)$$

где C_m - максимально возможное сжатие стенок трещины, мм; K_{ni} - начальная нормальная жесткость трещины, МПа/мм.

По модели Бартона-Бандиса [Bandis et al, 1983] начальная нормальная жесткость трещины и максимально возможное сжатие были определены эмпирическим путем в ходе выполнения лабораторных исследований на различных образцах. Данные параметры выражаются через: JRC , JCS и E_0 .

Значимую роль на формирование наблюдаемой раскрытости оказывает сдвиговое перемещение берегов трещины, за счет чего происходит смещение одного борта трещины относительно другого. Величина раскрытия, обусловленная сдвиговой составляющей перемещения, дилатансией (E_d), является функцией от U_s –сдвигового перемещения, мм и динамического угла дилатансии - d_m [Barton, 1982]. На *Рисунок 1* показан прирост раскрытости за счет касательного напряжения.

$$E_d = U_s * tg d_m \quad (6)$$

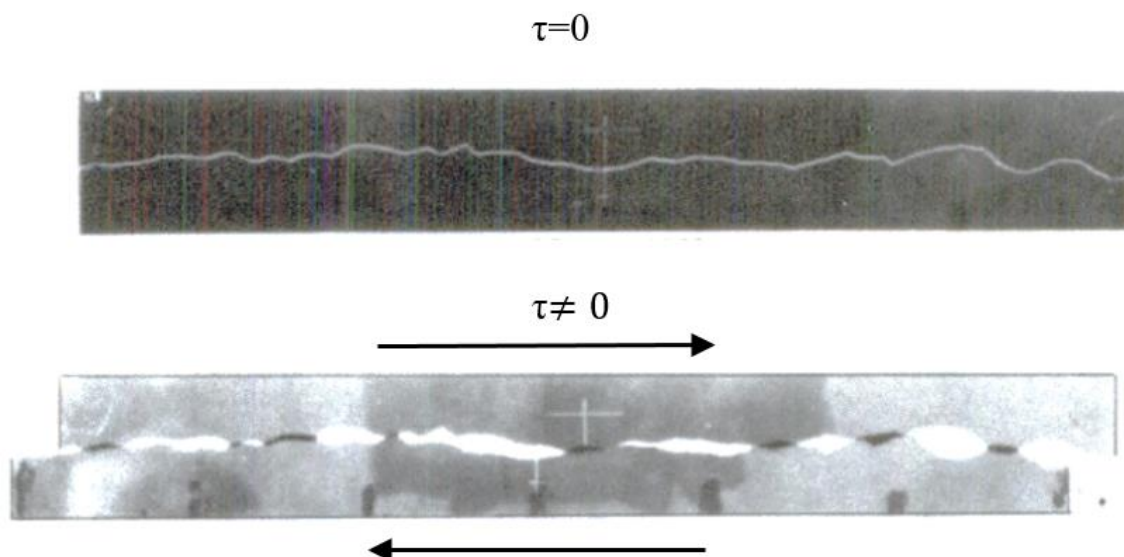


Рисунок 1. Сдвиговое перемещение по плоскости разрыва [Barton and Choubey, 1977].

Выводы по главе 1. Материал данной главы содержит последовательное изложение существующих подходов к оценке критически напряженного состояния трещины по критерию сухого трения и нелинейному критерию прочности трещины на сдвиг (Н. Бартона). Рассматривается напряженное состояние пласта и скважины в контексте разработки подхода по расчету параметров трещины в околоскважинной зоне. В модели раскрытости Бартона-Бандиса большая часть параметров определяется эмпирическим путем, что создает последующие ограничения в применимости данной модели механического раскрытия, наибольшая неопределённость состоит в определении коэффициента шероховатости трещины.

Глава 2. Критерии прочности трещины на сдвиг и исследование взаимосвязи между параметрами скважины и напряженным состоянием трещины. Рассмотрено напряженное состояние трещины по критерию сухого трения и по нелинейному критерию прочности трещины на сдвиг (Н. Бартона), также анализируется правило Байерли [Byerlee, 1978]. В разделе 2.1. приводятся результаты сравнения критериев прочности при изменении основных параметров, которые характеризуют морфологию разрыва и тип породы. В случае нелинейного критерия некоторые параметры были приняты следующим образом: предел прочности на сжатие стенки трещины (JCS) равен 20 МПа, остаточный угол трения 32 град., что соответствует коэффициенту 0,6 (тем самым при коэффициенте шероховатости равным 0, критерий сухого трения и критерий прочности трещины на сдвиг будут одинаковы). Варьируется только параметр коэффициент шероховатости (JRC) с шагом 4 единицы начиная с двух: $JRC = [2; 6; 10; 14; 18]$. Можно отметить следующие характерные особенности ():

- увеличение JRC с 2 до 18 приводит к большей нелинейности линии предельного состояния;
- при заданном уровне эффективного нормального напряжения, меньшем чем JCS , предельное касательное напряжение в случае нелинейного критерия больше, чем в случае критерия сухого трения, тем самым с увеличением коэффициента шероховатости трещину сложнее активировать;
- отношение $\frac{JCS}{\sigma_n}$ играет очень важную роль, в случае когда данное отношение приближается к единице предельные касательные напряжения как по критерию сухого трения, так и по нелинейному критерию становятся равными.

- так как критерий прочности трещины на сдвиг Н. Бартона является эмпирическим критерием, он применим только в определённом диапазоне значений параметров. В частности, величина $tg \left(JRC * lg \frac{JCS}{\sigma'_n} + \varphi_{ост} \right)$ может быть отрицательным числом, что
- приводит к отрицательному значению предельного касательного напряжения по критерию Бартона.

Исследован другой случай, когда $JRC = 10$, но варьируется предел прочности на сжатие материала стенок трещины JCS в диапазоне 10 - 40 МПа (Рисунок 3), остаточный угол трения такой же, как и в предыдущем варианте. На рисунке можно отметить, что с увеличением JCS растёт критическое касательное напряжение, тем самым трещину с большим JCS будет труднее активировать, область касательного напряжения по нелинейному критерию находится между правилом Байерли и критерием сухого трения, исключение составляет низкий уровень эффективного нормального напряжения.

В разделе 2.2. проведено исследование критически напряженного состояния трещин на примере трещинного карбонатного коллектора одного из месторождений нефти и газа. Рассматриваемый резервуар характеризуется сложным структурно-тектоническим строением, большое разнообразие разрывных нарушений предопределило блоковое строение залежей углеводородов и развитие тектонической трещиноватости разной пространственной ориентации и типа. Изучение резервуара в скважинном пространстве геофизическими методами исследования (ГИС, ПГИ) показало, что только малая часть трещин являются флюидопроводящими в пластовых условиях. Исходя из данной проблематики, основная цель работы заключалась в поиске подхода, который бы позволил дифференцировать флюидопроводящие трещины от трещин закрытых.

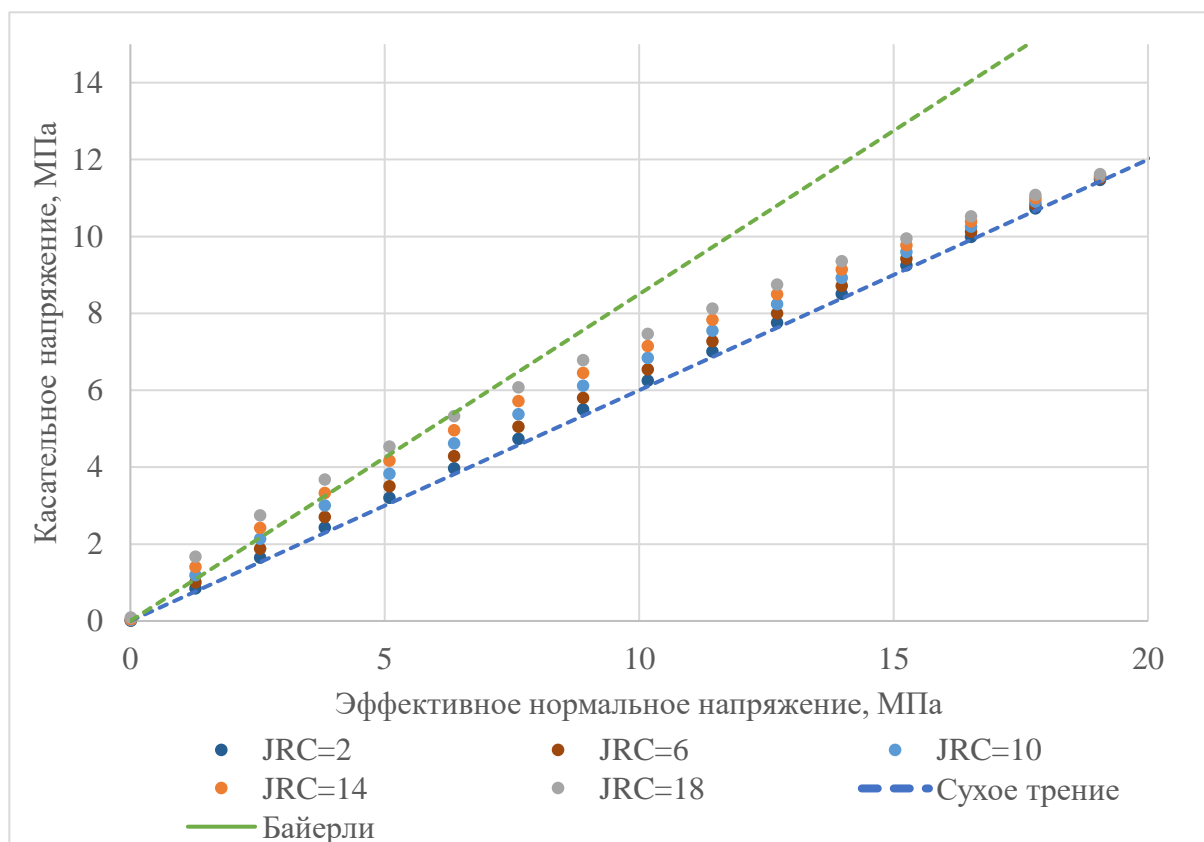


Рисунок 2. График критического касательного напряжения для разных критериев прочности в случае $JCS \geq \sigma'_n$.

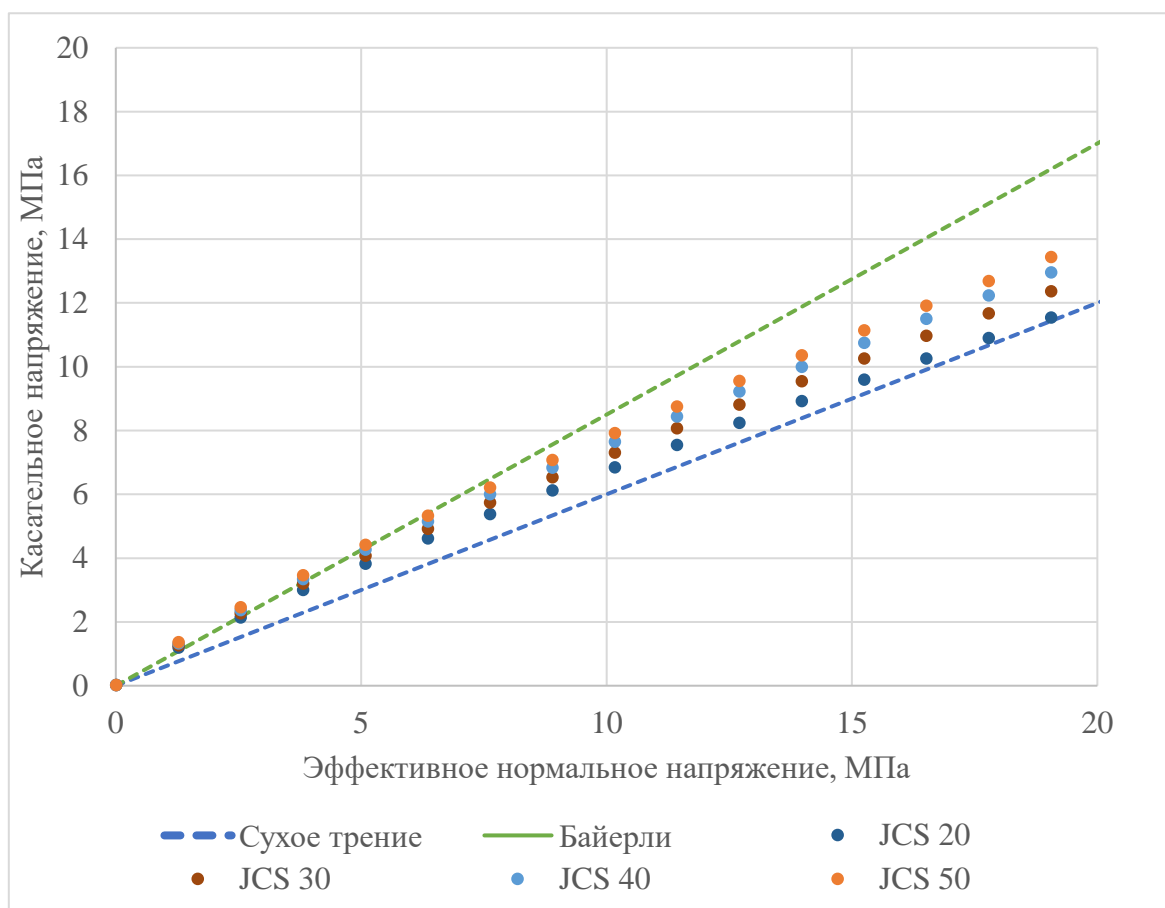


Рисунок 3. График критического касательного напряжения для различных критериев прочности ($JRC=10$).

На основе данных специализированных методов ГИС, а именно кросс-дипольного акустического каротажа и плотностного гамма-гамма каротажа были рассчитаны непрерывные профили динамических упругих свойств в скважинах, далее на основе выполненных лабораторных геомеханических исследований образцов керна, построены корреляции для определения профилей статических упругих и прочностных свойств. Учитывая неопределенности, связанные с определением величины горизонтальных напряжений и неоднозначность в интерпретации азимута максимального горизонтального напряжения, выполнены многовариантные расчеты напряженного состояния пласта и как следствие – критически напряженного состояния трещин. Далее проведено сопоставление результатов расчетов для зон, содержащих критически напряженные трещины, с данными ПГИ (промыслово-геофизические исследования) и интерпретацией проницаемых интервалов по кросс-дипольному акустическому каротажу. На основании проведенных расчетов установлено, что наилучшее соответствие модельных данных наблюдается для сбросового геодинамического режима при отношении горизонтальных напряжений равном 1,25, азимуте максимального горизонтального напряжения 110 градусов и угле внутреннего трения трещиноватой породы 20 градусов.

Помимо визуального сопоставления проницаемых интервалов по ПГИ и зон критически напряженных трещин, было рассчитано результирующее напряжение ($FVAL$):

$$FVAL = \tau - \sigma_n' tg \varphi, \quad (7)$$

где φ - угол трения трещиноватой породы.

Трещины с $FVAL > 0$ являются критически напряженными, как уже ранее отмечалось трещины в таком напряженном состоянии, будут способны проводить флюид в коллекторе. Поэтому был выполнен анализ корреляции между коэффициентом продуктивности скважины и параметром $FVAL$. Для этого было рассчитано среднее по скважине значение $FVAL$ путём усреднения точечных данных по каждой критически напряжённой трещине и проведено

сравнение такого среднего с данными о продуктивности скважин. В результате обнаружена значимая корреляция коэффициента продуктивности со средним результирующим напряжением $FVAL$ [Жигульский и др., 2018]. Построено две корреляции (8) и (9), разделение на два кластера может быть объяснено блоковым строением залежи (трещины различного генезиса и иерархического уровня), а также особенностями геологического строения (изменение насыщения, минералогического состава, различная хрупкость пород), которые также необходимо учесть для повышения точности прогноза флюидопроводящих зон.

$$FVAL = 126.08 * K \quad R^2 = 0.71 \quad (8)$$

$$FVAL = 115.92 * K \quad R^2 = 0.76 \quad (9)$$

K – коэффициент продуктивности

В разделе 2.3. рассматривается подход к оценке коэффициента трения породы на основании допущения о том, что критически напряженные трещины являются флюидопроводящими. Анализировались скважины, пробуренные в одном тектоническом блоке, в одной из скважин, несмотря на высокую плотность трещин, не выявлено проницаемых интервалов по ПГИ и не был получен приток пластового флюида, тогда как в другой скважине, расположенной на расстоянии менее 3 км, наблюдается противоположная ситуация. При этом пространственная ориентация трещин для скважин различна, тогда как вмещающие породы одинаковы, следовательно, коэффициент трения можно считать постоянным. Это позволило определить возможный диапазон изменения угла трения, с учётом имеющихся неопределённостей в значениях и направлениях главных напряжений. По результатам расчета среднее значение угла трения может меняться в пределах от 31,5 градусов до 18,9 градусов.

Помимо обнаруженной связи коэффициента продуктивности со средним результирующим напряжением ($FVAL$), была изучена его связь с такими параметрами как число критически-напряженных трещин (N), статический модуль Юнга в интервале критически напряженных трещин, длина фрагмента ствола в области критически напряженных трещин (L). Ниже представлена таблица коэффициентов корреляции, можно отметить, что значимые величины коэффициента характерны для параметров N и L . В выборке участвовало 12 скважин, в которых были проведены промыслово-геофизические исследования и была интерпретация флюидопроводящих интервалов [Zhigulskiy, 2019]. Тем самым, для прогноза перспективных зон, так называемые “sweet spots” требуется проведение исследования трещиноватости с помощью пластового микросканера и построение геомеханической модели с оценкой критически-напряженных трещин.

Выводы к Главе 2. Материал данной главы относится к обоснованию защищаемых положений 1 и 2. Проведено сравнение между различными критериями прочности, которые определяют переход трещины в критически напряженное состояние. Показана важность определения таких параметров как коэффициент шероховатости трещины и предела прочности на сжатие материала стенки трещины. Отмечается, что увеличение коэффициента шероховатости приводит к большей нелинейности предельной кривой, определяемой критерием прочности. В условиях невысоких эффективных напряжений, соответствующих глубинам залегания нефтегазовых коллекторов, морфология поверхности контакта будет иметь значительное влияние на возникновение последующей подвижки по трещине. Но использование нелинейного критерия выдвигает высокие требования к определению исходных параметров. На примере трещинного коллектора нефти и газа продемонстрирована связь между коэффициентом продуктивности скважины и такими параметрами как: результирующее напряжение, длина фрагмента ствола в зоне критически напряженных трещин и количество критически напряженных трещин. Полученные эмпирические связи могут быть использованы для прогноза зон перспективных для бурения и освоения.

Таблица 1. Корреляционный анализ (в таблице указаны коэффициенты корреляции).

Параметр	Коэфф. продуктивности	N	Статический модуль Юнга	L
У-коэф. продуктивности	1			
N- число критически напряженных трещин	0,63	1		
Статический модуль Юнга	0,32	0,40	1	
L- длина фрагмента ствола, проходящегося на зону критически напряженных трещин	0,76	0,62	0,27	1

Глава 3. Модель раскрытия Бартона-Бандиса, анализ чувствительности и численное моделирование. В данной главе приводится описание модели раскрытости Бартона-Бандиса, так как данная модель содержит в себе ряд параметров, которые определяются эмпирическим путем, был проведен анализ чувствительности модели, а также численное моделирование напряженного состояния системы трещин. В разделе 3.1. описан подход к проведению анализа чувствительности модели раскрытости. Многообразие входных параметров в модели Бартона-Бандиса, каждый из которых характеризуется собственной степенью неопределенности, требует выполнить анализ чувствительности модели к входным данным. Для этого варьировались главные напряжения, направление действия максимального горизонтального напряжения, пространственная ориентация трещины и свойства трещины. Чувствительность параметра механическое раскрытие оценивалась относительно базового сценария ($E = 0.066$ мм), при изменении значений входных данных в диапазоне +/- 20% относительно средних значений, отвечающих базовому сценарию (значения по параметрам менялись поочередно).

Принятый режим напряжений соответствует сбросовому/нормальному. Вертикальное напряжение принято 55,90 МПа, максимальное горизонтальное напряжение 34 МПа, минимальное горизонтальное напряжение 30,2 МПа, поровое давление 18,5 МПа, азимут максимального горизонтального напряжения 110 градусов. Параметры трещин следующие: азимут простирания 211 градусов, угол падения 82 градуса, JRC равен 10, $JCS = 65$ МПа, длина трещины 100 м, остаточный угол трения 25 градусов.

Построено два графика (Рисунок 4 и Рисунок 5), отражающих изменение механической раскрытости при изменении параметров модели на +/- 20%. На первом анализируется влияние параметров напряжённо-деформированного состояния пласта и трещин (т.е., исходный набор свойств, который участвует в расчетах остальных параметров). Самая высокая чувствительность характерна для параметров: JRC , JCS , ΔV_j (величина смыкания стенок трещины, мм), St (максимальное смыкание берегов трещины, мм), E_0 (начальное раскрытие, мм). Такие свойства как $JRCm$ (динамический коэффициент шероховатости, используется для определения угла дилатансии), Ed , Usp (максимальное сдвиговое перемещение) оказывают незначительное влияние на изменение раскрытости относительно базового значения.

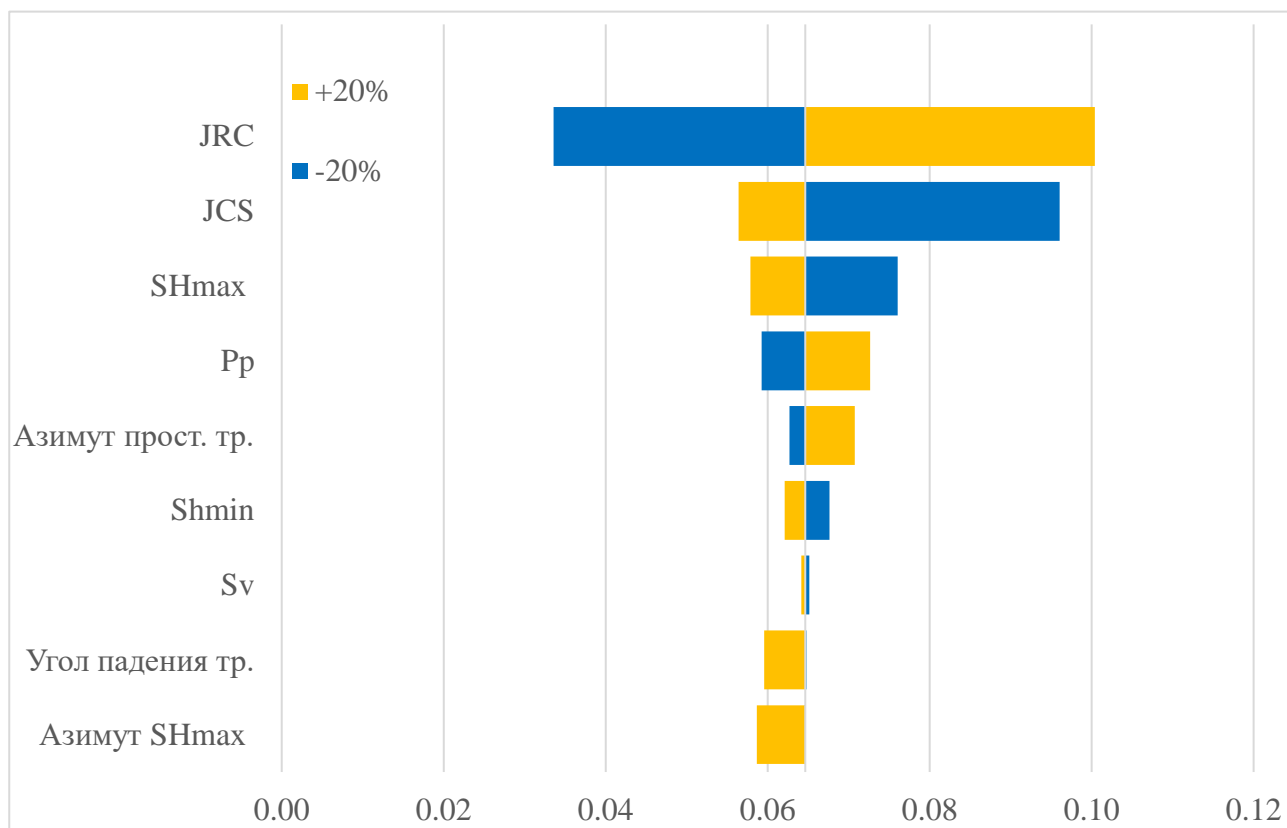


Рисунок 4. Анализ чувствительности свойства механическое раскрытие от исходного набора данных (*JRC*- коэффициент шероховатости, *JCS* – предел прочности на сжатие материала стенки трещины, *SHmax*- максимальное горизонтальное напряжение, *Pr*- поровое давление, *Shmin*- минимальное горизонтальное напряжение, *Sv*- вертикальное напряжение).

В разделе 3.2. рассматриваются результаты построения численной конечно-элементной модели трещиноватого пласта. Проведено параметрическое исследование критически напряженного состояния системы различным образом ориентированных трещин и раскрытости трещин для различного коэффициента шероховатости. Мощность моделируемого трещиноватого пласта составила 50 м, с размером ячеек сетки 50м*50м*0,5 м. Деформационные свойства ненарушенной породы были приняты постоянными (модуль Юнга = 15 ГПа, коэффициент Пуассона = 0,25). Граничные условия в модели были заданы через тектонические деформации: минимальная горизонтальная деформация принята 0.0001, максимальная 0.0002, азимут максимального горизонтального напряжения 130 градусов.

Для изучения влияния коэффициента шероховатости на напряженно-деформированное состояние в поле 3D были определены параметры жесткости трещин, используя модель Бартона-Бандиса, для вариантов: $JRC = 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18$ [Жигульский, Тихоцкий, 2020]. В итоге проведено 9 численных симуляций и по каждой оценивались действующие напряжения на плоскости трещины механическая и гидравлическая раскрытость. Сдвиговое перемещение берегов трещины было получено в ходе конечно-элементного моделирования и использовалось для оценки раскрытости, обусловленной дилатансией. По результатам моделирования сделан вывод, что шероховатость значительно влияет на раскрытость: с ростом шероховатости трещины увеличивается механическая раскрытость. Но в случае $JRC = 2; 4; 6; 8$, при тех граничных условиях, которые были заданы в 3D геомеханической модели в модели Бартона-Бандиса получены отрицательные значения механической раскрытости, это было связано с тем, что величина смыкания стенок трещины, которая зависит от эффективного нормального напряжения, превышала начальное раскрытие и раскрытость, связанную с

дилатансией. Для $JRC = 10; 12; 14; 16$ механическая раскрытость меняется в диапазоне (0,0001 мм – 0,2 мм). Это позволяет сделать вывод о том, что напряженное состояние трещины и способность активации находится в тесной взаимосвязи с параметром JRC .

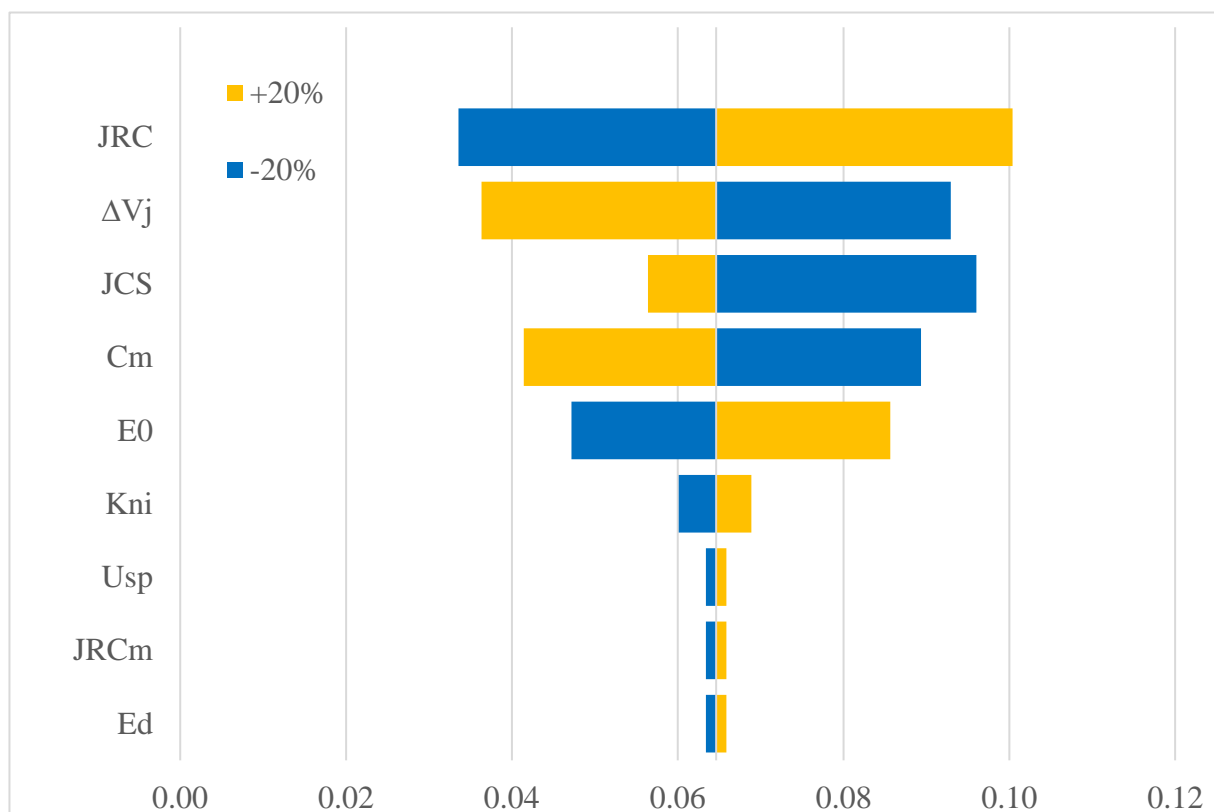


Рисунок 5. Анализ чувствительности свойства механическое раскрытие от данных, входящих в модель (JRC - коэффициент шероховатости, JCS – предел прочности на сжатие материала стенки трещины, ΔV_j - величина смыкания стенок трещины, C_m - максимальное смыкание берегов трещины, E_0 - начальное раскрытие, JRC_m - динамический коэффициент шероховатости, E_d – раскрытие, обусловленное дилатансией, U_{sp} - максимальное сдвиговое перемещение, K_{ni} – начальная жесткость трещины).

На Рисунок 6 показан график в координатах гидравлическая раскрытость (мм) [Barton, 1982; Barton et al., 1994] – эффективное нормальное напряжение. Расчет был проведен только для того случая, когда механическая раскрытость положительна.

Выводы к Главе 3. Материал данной главы относится к обоснованию защищаемого положения 3. Показана высокая чувствительности параметра раскрытости трещины по модели Бартона-Бандиса к исходным параметрам. Проводимый анализ чувствительности для произвольно ориентированной трещины показал, что максимальная чувствительность механической раскрытости связана с такими параметрами как коэффициент шероховатости трещины, предел прочности на сжатие материала стенок разрыва, величины смыкания берегов трещины и конечно же начальной раскрытости, которая зависит от коэффициента шероховатости. По результатам выполненного численного моделирования получены оценки механической и гидравлической раскрытости трещины. Тем самым модель Бартона-Бандиса показывает содержательные оценки раскрытости.

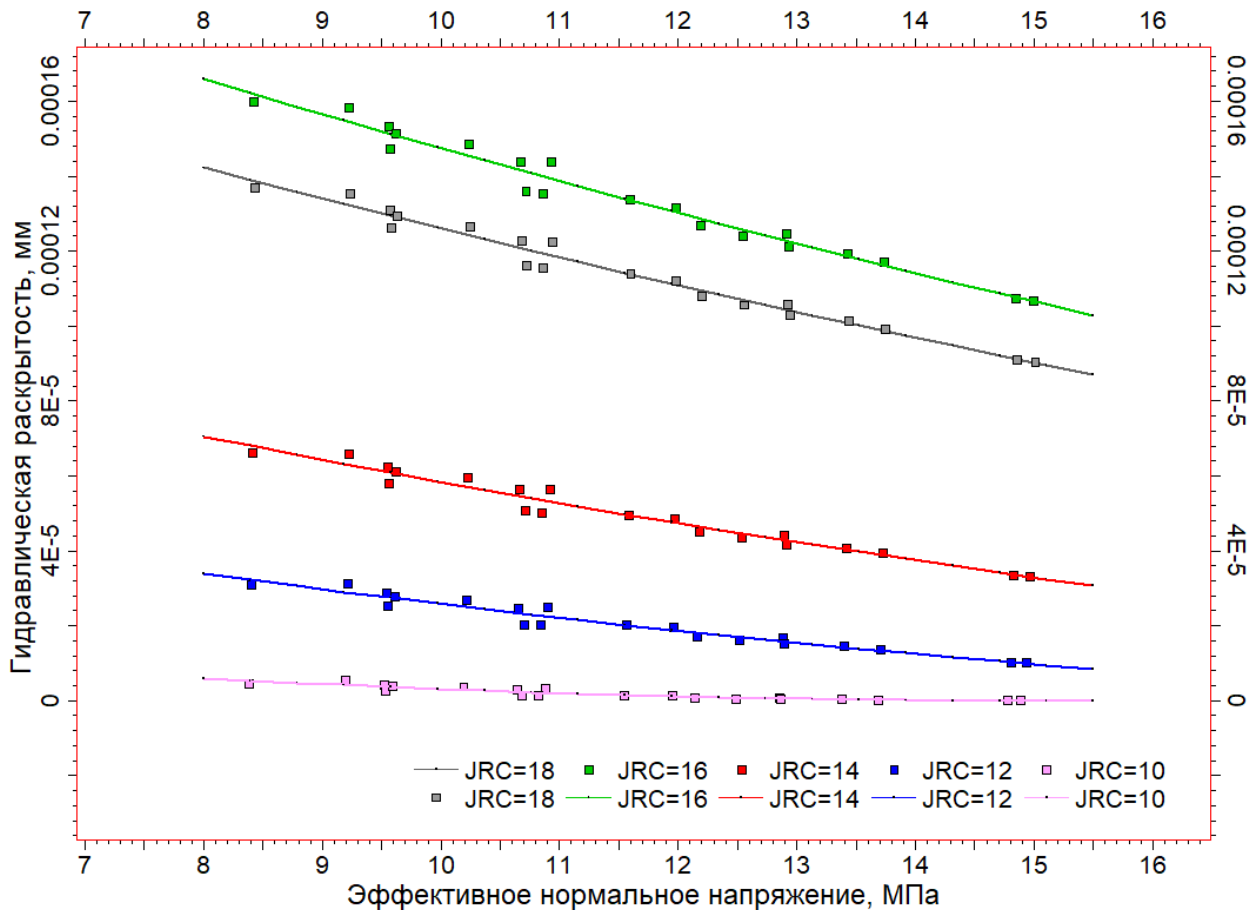


Рисунок 6. Гидравлическое раскрытие и эффективное нормальное напряжение.

Глава 4. Критически напряженное состояние трещины и расчет величины раскрытости в околоскважинном пространстве. В данной главе подробно описан подход по оценке критически напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне, показано сопоставление данных пластового микросканера с результатами комплексирования модели критически напряжённых трещин и модели Бартона-Бандиса. Напряженно-деформированное состояние трещины оценивалось с учетом действующих напряжений в скважине, тем самым получены компоненты касательного и эффективного нормального напряжения в развертке 0 - 360 градусов (контур пересечения трещины и скважины).

В разделе 4.1. приводится описание методики оценки напряженного состояния и раскрытости трещины. Существование в массиве скважины изменяет начальное поле напряжений, вследствие чего возникает концентрация напряжений по окружности ствола. Если скважина пересекает плоскость трещины, то напряженное состояние плоскости будет уже зависеть не только от региональных напряжений, а еще от нового поля напряжений в окрестности ствола. Чтобы оценить новое напряженное состояние трещины с учетом скважинных условий требуется выполнить некоторые преобразования.

Реализованный подход по оценке параметров трещины в околоскважинной зоне можно разбить на несколько шагов, показанных в виде блок-схемы на *Рисунок 7*. Частично данный подход был описан в [Овчаренко, Жигульский и др., 2020], [Базыров, 2021], где также рассматривается напряженное состояние трещины на стенке скважины с учетом давления внутри ствола скважины. В ходе выполнения данной работы был внесен ряд корректировок а именно, при конвертации трещины в пространство скважины и расчете напряженного

состояния трещины в околоскважинной зоне. Также был рассмотрен алгоритм отображения результатов моделирования (критически напряженного состояния по двум критериям прочности и раскрытости по модели Бартона-Бандиса) на данные пластового микросканера, что является новым подходом, ранее не описанным в литературных источниках.

На результатах интерпретации данных пластового микросканера трещина отображается в виде синусоиды, амплитуда которой зависит от угла падения трещины. Чтобы отобразить результаты расчетов, а именно величину раскрытия и критически напряженное состояние по заданным критериям, требуется построить исходную синусоиду и присвоить ей атрибут свойства.

Для реконструкции синусоиды необходимо использовать данные кажущегося угла падения и азимута падения трещины (интерпретация пластового микросканера), а также величину фактического диаметра скважины. Эти данные представлены в виде набора точечных данных, каждая точка есть середина синусоиды. Высота синусоиды выражается геометрически следующим образом:

$$h = \left(\tan \left(\text{dip} * \frac{\pi}{180} \right) * (avD + 2 * D) \right) / 2, \quad (10)$$

где avD - фактические данные каверномера, мм;

D - номинальный диаметр ствола скважины, мм.

Следует отметить, что изображение микросканера показывает кажущуюся раскрытость трещины и на видимую область трещины оказывает большое влияние целостность стенок скважины и проникновение бурового раствора в область трещины [Barton, Tessler et al., 1991], так как прибор довольно чувствителен к различным повреждениям стенки скважины. Сопоставление следует рассматривать как возможность на качественном уровне сравнивать критически напряженное состояние трещины и ее раскрытие в околоскважинной зоне (с учетом влияния давления внутри ствола) с визуальным отображением трещины в виде некоторой плоскости (синусоиды).

Результаты исследования показали, что в околоскважинной зоне трещина может быть частично критически напряженной при заданном давлении в скважине и напряженном состоянии пласта. Это наблюдение является важным для уменьшения рисков поглощения бурового раствора при вскрытии системы трещин скважинной и для увеличения эффективности освоения трещиноватых коллекторов.

В разделе 4.2. рассматриваются результаты расчетов критически напряженного состояния и раскрытости трещины на примере трещинного коллектора. Объектом исследования являлся трещинный коллектор рифейского возраста, рассматривалась разведочная скважина, в которой был проведен необходимый комплекс исследований для построения 1D геомеханической модели (акустический широкополосный каротаж, ультразвуковое сканирование стенок скважины, исследования керна).

По результатам геомеханического моделирования проведен расчет напряжений, которые действуют в кольцевом пространстве вокруг скважины (радиального (σ_{rr}), осевого (σ_{zz}), тангенциального ($\sigma_{\theta\theta}$) и касательного в плоскости θz ($\sigma_{\theta z}$). Зная пространственную ориентацию трещины, которая может была определена по результатам интерпретации данных ультразвукового микросканера, можно оценить нормальное и касательное напряжения, действующие на трещину (τ , σ'_n).

На основании данных об ориентации скважины и величине действующих пластовых напряжений были оценены напряжения в околоскважинной зоне. Расчет выполнялся для угла θ , меняющегося от 0 до 360 градусов с шагом 1 градус. Применяя критерий сухого трения и нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг проведена оценка критически-напряженного состояния заданных трещин.

В случае нелинейного критерия прочности трещины на сдвиг (Н. Бартона) расчет выполнялся для различных коэффициентов шероховатости ($JRC=2, 8, 16$), поскольку лабораторные определения данного параметра в периметре месторождения отсутствуют. С ростом JRC поверхность трещины характеризуется большей неоднородностью/шероховатостью и чем меньше JRC , тем более сглажена поверхность разрыва. Результаты расчетов показаны на *Рисунок 8*, красным контуром показана критически напряженная часть трещины, зеленым – часть трещины, которая не является критически напряженной.

Проведенный расчет напряженного состояния трещин с типизацией трещин на критически напряженные/активизированные и критически не напряженные/не активизированные с учетом напряжений, действующих в околоскважинном пространстве, не противоречит данным пластового микросканера. Наибольшая сходимость наблюдается для $JRC = 8$, в таком случае «темная» часть синусоиды (трещины) на изображении пластового микросканера практически точно соответствует той области, где трещина является критически напряженной.

Таблица 2. Параметры пласта, трещины и скважины.

Пласт					
S_v	Sh_{max}	Sh_{min}	P_p	Азимут SH_{max}	Впо/Козф. Пуассона
МПа	МПа	МПа	МПа	град.	
57,3	40,6	33,5	18,85	110	1/0,24
Трещина					
Азимут пр.	Угол падения	JRC	JCS	фост	UCS
238	80	2-8-16	87	33	87
Скважина					
Давление	Азимут	Зенитный угол			
19	0	0			

Применение модели Бартона-Бандиса позволило оценить диапазон вариации раскрытости для различных коэффициентов шероховатости. Механическая раскрытость меняется в диапазоне 0,032-0,037 мм для $JRC = 2$, в диапазоне 0,065-0,140 мм для $JRC = 8$ и 0,210-0,310 мм для $JRC = 16$. Таким образом, с ростом JRC раскрытость увеличивается. Это связано, в основном, с тем, что механическое раскрытие зависит от начального раскрытия. В случае $JRC=16$ начальное раскрытие будет намного выше, чем при $JRC=2$, что обуславливает, в конечном счете, большую механическую раскрытость при имеющимся уровне смыкающего напряжения.

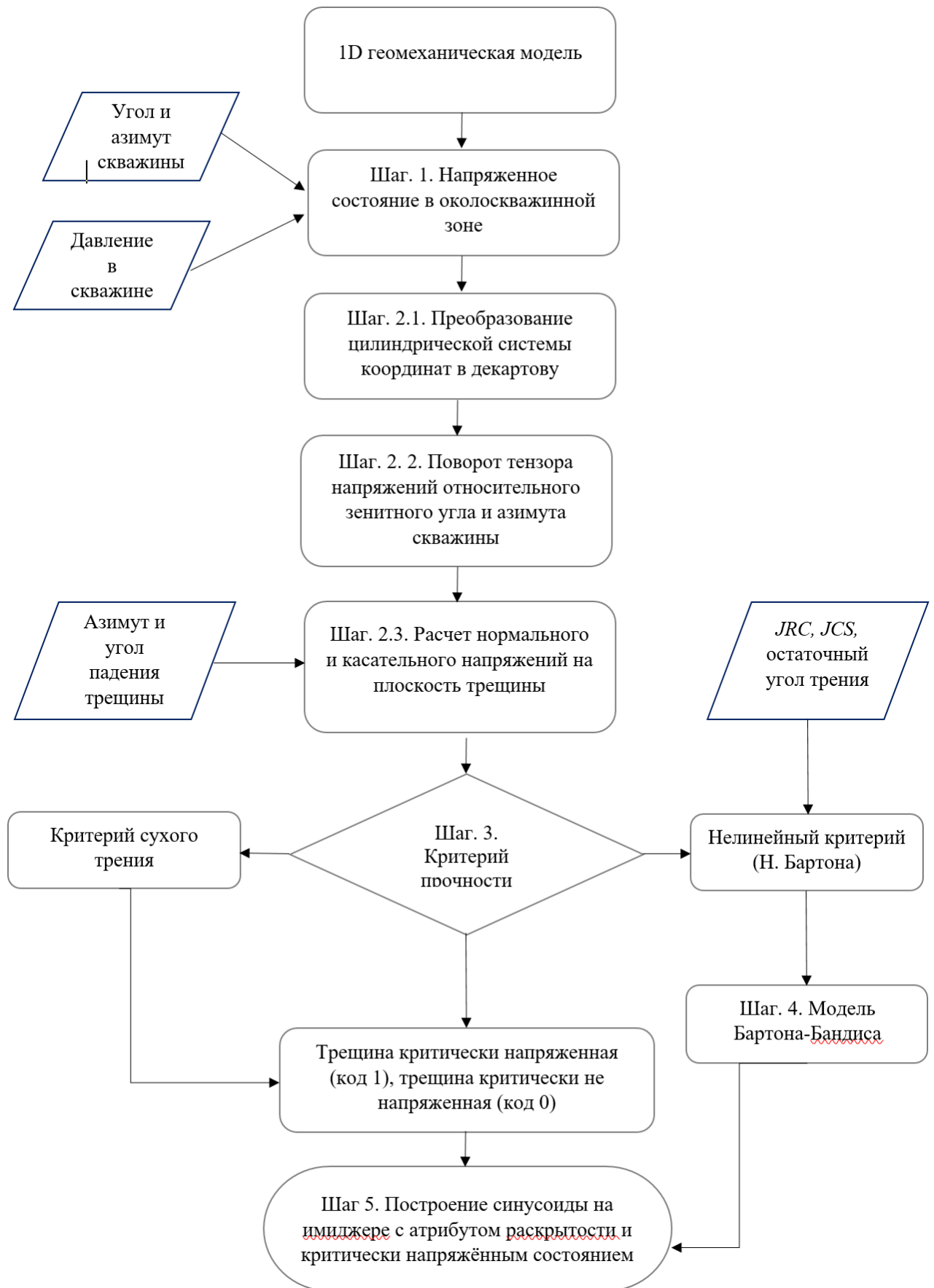


Рисунок 7. Блок-схема по расчету критически напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне.

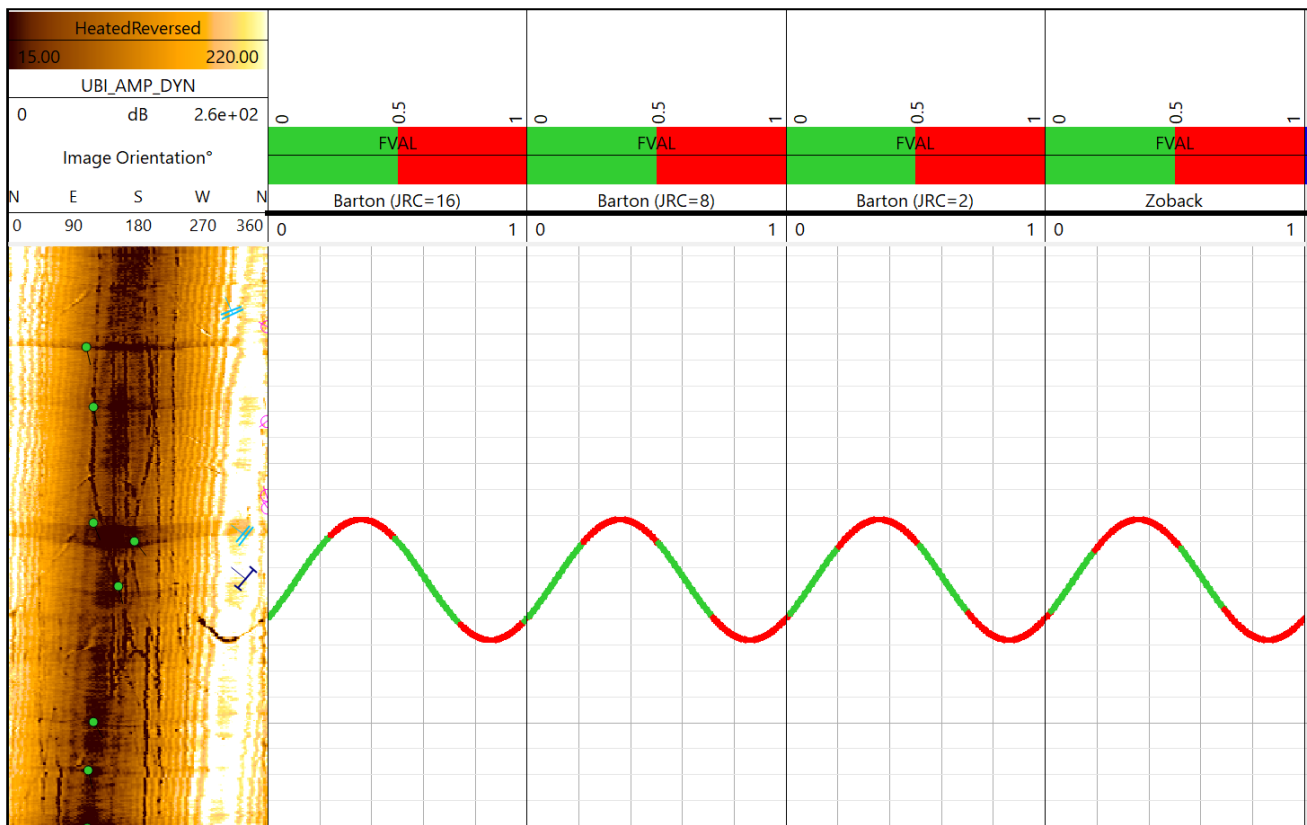


Рисунок 8. Трещина на глубине 2478 м результаты расчета критически напряженного состояния трещины для критерия сухого трения и критерия Н. Бартона ($JRC=16;8;2$).

Разработанная методика позволяет провести расчёты для всего набора трещин, который ранее был выделен по результатам интерпретации пластового микросканера. В качестве примера рассмотрим две скважины: одна скважина вертикальная и вторая с горизонтальным окончанием. Скважины вскрывают карбонатную трещиноватую толщу. В случае вертикальной скважины для расчета критически напряженного состояния и раскрытости трещин были приняты следующие значения параметров: остаточный угол трения равный 28 градусов, давление внутри скважины 18 МПа (при пластовом давлении 19 МПа), JRC равный 2 (Рисунок 9). Можно отметить, что несмотря на значительное количество трещин, которые были отнесены к типу «уверенные трещины» (т.е. такие трещины, для которых синусоида на изображении пластового микросканера прослеживается более чем на 50% своей длины), в условиях околоскважинного пространства данные трещины лишь частично критически напряжены.

В результате расчета раскрытости получены оценки в диапазоне 0,01-0,03 мм, так как при разработке данного инструмента расчет раскрытости и критически напряженного состояния являются независимыми (т.е., раскрытие рассчитывается для всех трещин, несмотря на то, что некоторые области трещины не находятся в критически напряженном состоянии). Поэтому оценки раскрытия рассчитываются по всей синусоиде.

Рассмотрен еще один случай, когда анализируем тот же массив трещин, скважина вертикальная, но меняем давление внутри скважины (увеличиваем до 24 МПа) и увеличиваем коэффициент шероховатости до 18 (Рисунок 10). Наблюдаем значительное увеличение раскрытости, значения меняются в диапазоне 0,01-0,5 мм. Таким образом, если с точки зрения критически напряженного состояния области имеют схожую конфигурацию по двум вышеприведённым примерам, то рассматривая раскрытость как независимую величину, наблюдаем высокую чувствительность к входным данным.

Также исследовано критически напряженное состояние и раскрытость системы трещин на примере горизонтальной скважины, давление внутри ствола равно 18МПа и коэффициент шероховатости трещины равный 10 (Рисунок 11). Наблюдаем, что по результатам расчетов большая часть трещин является критически напряженной практически по всей области синусоиды (более 50% площади синусоиды). Получается, что несмотря на то, что давление в вертикальной и горизонтальной скважинах равны, во втором случае намного больше критически напряженных трещин.

Выводы к Главе 4. Материал данной главы относится к обоснованию защищаемого положения 4. Разработан подход по оценки критически напряженного состояния и раскрытости трещины и системы трещин в околоскважинном пространстве в условиях известного напряженно-деформированного состояния пласта. Результаты моделирования раскрытости и критически напряженного состояния показали высокую сходимость при сопоставлении с данными пластового микросканера (видимая область трещины на имиджере является критически напряженной и характеризуется большей раскрытостью).

Данный подход был применен на примере трещинного коллектора углеводородов, расчет критически напряженного состояния трещин выполнен для двух скважин. Видимость трещин по окружности ствола неравномерная, об этом свидетельствует частично прослеживаемая синусоида в развертке на 360 градусов. Именно это позволило косвенно сделать допущение о том, что трещина при частичном прослеживании будет характеризоваться неравномерным раскрытием, а также будет испытывать различный уровень критического напряжения.

Приводится подробное описание результатов сопоставления расчета раскрытости трещины по модели Бартона-Бандиса для различных коэффициентов шероховатости с данными пластового микросканера. Сделан вывод о том, что при полученном уровне действующего эффективного нормального напряжения максимально раскрытыми будут трещины с большим JRC, в данном случае для варианта, когда $JRC = 16$. В случае, когда $JRC = 2$ (практически отсутствует шероховатость) получаемое раскрытие достаточно низкое, что не отвечает разрешающей способности пластового микросканера.

Также показано, что несмотря на то, что скважина вертикальная, различным образом ориентированные трещины будут испытывать различный уровень напряжений по стволу скважины, что приведет к различному критически напряженному состоянию в развертке 0-360 гр.. Также приведено несколько примеров с расчетом раскрытости и критически напряженного состояния системы трещин в случае вертикальной и горизонтальной скважин, показана чувствительность результатов расчета раскрытости при изменении давления внутри ствола и коэффициента шероховатости. В случае горизонтальной скважины большая часть трещин находилась в критически напряженном состоянии и характеризовалась большим раскрытием.

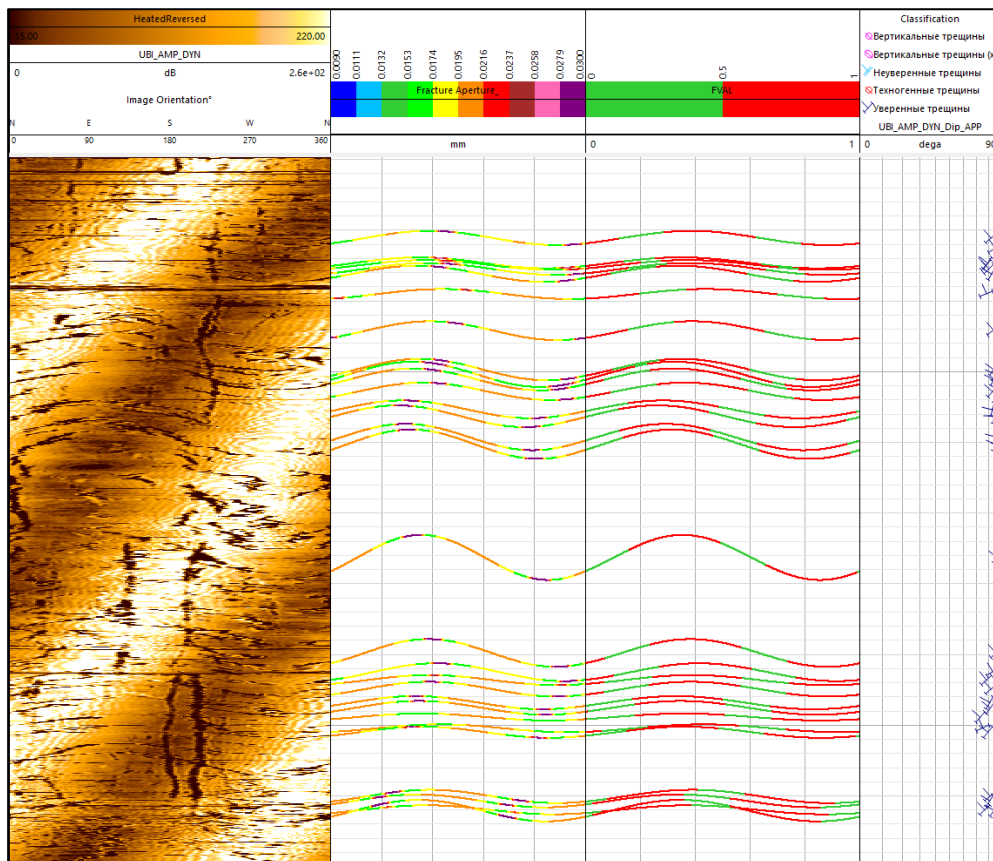


Рисунок 9. Пример расчета раскрытости и критически напряженного состояния трещины (скважина вертикальная, JRC=2)

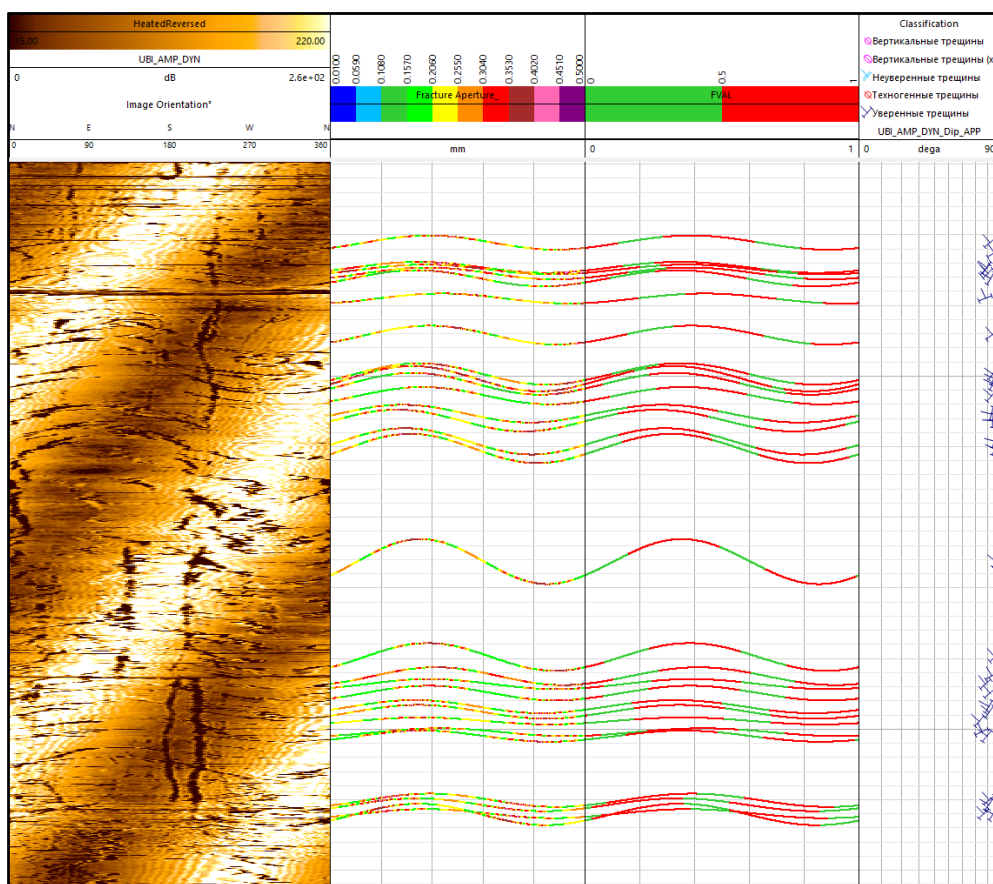


Рисунок 10. Пример расчета раскрытости и критически напряженного состояния трещины (скважина вертикальная, JRC=18)

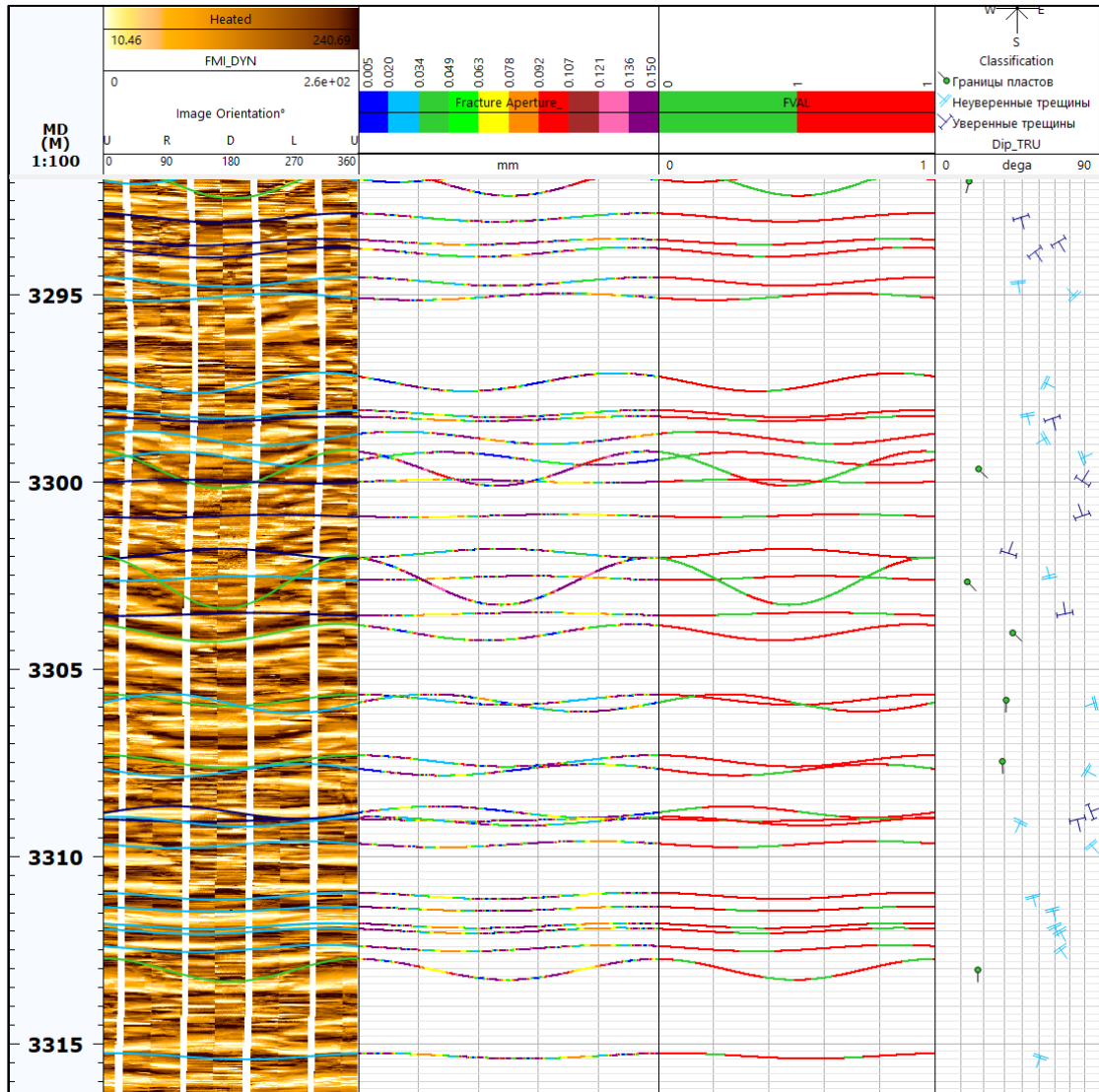


Рисунок 11. Пример расчета раскрытости и критически напряженном состоянии трещины при давлении в скважине равным 18МПа (скважина горизонтальная, для трещин $JRC=10$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование является актуальным и позволяет сформировать прикладные решения для повышения эффективности освоения трещинных коллекторов. Были рассмотрены два направления исследования: первое – это оценка критически напряженного состояния трещин в пластовых условиях и второе – это расчет раскрытости и критически напряженного состояния трещин в околоскважинной зоне.

В первом случае обнаружены значимые корреляции между коэффициентом продуктивности скважин и геомеханическими параметрами, такими как: результирующее напряжение, длина фрагмента ствола скважины в зоне критически напряженных трещин, количество критически напряжённых трещин, это позволяет сделать вывод о том, что для прогноза зон повышенной флюидопроводимости в пласте требуется также учесть напряженное состояние трещин. Во втором случае продемонстрирована методика оценки критически напряженного состояния и расчета раскрытости трещины по модели Бартон-Бандиса в околоскважинном пространстве, это в свою очередь позволяет оценить в дальнейшем удельный вес бурового раствора для предотвращения поглощений в процессе бурения, а также оптимальную траекторию ствола скважины, так как различная ориентация ствола по отношению к системе трещин будет влиять на изменения критически напряженного состояния по контуру трещины в скважине.

В работе подробно рассматриваются аргументы и контраргументы для использования того либо иного критерия прочности, сделано заключение о том, что нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг Н. Бартона дает более высокие значения предельного касательного напряжения с ростом коэффициента шероховатости при низком уровне действующего нормального напряжения. Важным при оценке критически напряженного состояния трещины является коэффициент шероховатости трещины (JRC) и отношение предела прочности на сжатие стенок трещины (JCS) к эффективному нормальному напряжению, действующему на трещины. Показано практическое применение линейного критерия прочности (критерия сухого трения) на одном из месторождений углеводородов.

Результаты моделирования критически напряженного состояния сопоставлены с данными по коэффициенту продуктивности скважин и данными о флюидопроводимости трещин по ПГИ. Это позволило снизить имеющиеся неопределенности по геомеханической модели, решив обратную задачу по определению напряженного состояния на основе данных о флюидопроводимости трещин.

Также были выявлены значимые корреляции между коэффициентом продуктивности и средним результирующим напряжением, а также – длиной фрагмента ствола в области критически напряженных трещин и количеством активизированных трещин. Отдельное внимание уделено рассмотрению модели раскрытия Бартона-Бандиса. Сформулированы основные ограничения данной модели на основе выполненного анализа чувствительности к входным параметрам. По результатам численного моделирования получены содержательные оценки раскрытости по модели Бартона-Бандиса.

Разработан подход по оценке напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне. Показано применение модели Бартона-Бандиса и анализа критически напряженного состояния трещины при интерпретации изображений трещин по данным пластового микросканера. По результатам сопоставления отмечается высокая сходимость результатов моделирования с интерпретацией по данным микросканера. Было показано как влияет ориентация ствола и давление внутри ствола на рост области критически напряженных трещин в околоскважинной зоне.

При отсутствии лабораторных исследований параметра JRC и фактических данных о давлении внутри ствола, по изображению пластового микросканера, с помощью данного подхода возможно найти диапазон значений параметров, входящих в модель Бартона-Бандиса, тем самым решая обратную задачу. Сделан вывод о дальнейшей перспективе применения данного инструмента для оценки напряженного состояния и проницаемости трещинных коллекторов в процессе бурения и освоения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Жигульский С.В.**, Лукин С.В. Геомеханическое и микросейсмическое сопровождение гидроразрыва пласта в сланцевой формации. *Геофизика*. 2018. № 4. С. 40-44.
2. **Жигульский С.В.**, Ротару А.В., Лукин С.В., Калинин О.Ю. и др. Прогноз критически-напряженной трещиноватости на основе тектонофизического и геомеханического моделирования на примере рифейского трещиноватого карбонатного резервуара Восточной Сибири // *Нефтяное Хозяйство*. 2017. №12. С. 24-27.

Публикации, не входящие в список ВАК:

1. **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. № 7-8. С. 30-38.

Патент:

Патент №2728039 Российской Федерации, МПК E21B 44/00 (2020.02), E21B 47/02 (2020.02), G06F 30/20 (2020/02). Способ (варианты) и система (варианты) определения траектории бурения скважины: заявлен 30.12.2019; опубликован 28.07.2020/ С.В. Лукин, Ю.В. Овчаренко, **С.В. Жигульский**, И.Ш. Базыров, А.В. Ротару, Р.Р. Нигматуллин, Д.О. Морозов, В.А. Грибанов. -40 с.: 3 ил.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

№2021667371 Российской Федерации. Программа для выбора оптимального забойного давления в процессе разработки и плотности бурового раствора в процессе бурения на основе расчета активности/проводимости плоскости разрыва (разлома или трещины): заявлен 15.10.2021; зарегистрирован 28.10.2021/ **С.В. Жигульский**, С.В. Лукин, Ю.В. Овчаренко, И.Ш. Базыров, А.С. Гунькин.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

1. **Жигульский С.**, Ротару А., Курбанов В. И др., Анализ критически напряженной трещиноватости с восстановлением тектонических стрессов для ранжирования площади по перспективности добычи на примере рифейского карбонатного трещиноватого коллектора/ SPE-191627-18RPTC-RU// Российская нефтегазовая техническая конференция SPE, 15-17 октября 2018 г., г. Москва
2. **Жигульский С.**, Оценка гидравлической апертуры трещин на основе детальной геомеханической модели: миф или реальность в условиях сложных трещинных коллекторов/ SPE-196896-RU// Российская нефтегазовая техническая конференция SPE, 22-24 октября 2019 г., г. Москва.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

1. **Жигульский С.В.** Анализ влияния шероховатости трещины на параметр раскрытости. Тезисы доклада. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2020 г., г. Москва.
2. **Жигульский С.В.** Изучение взаимосвязи между продуктивностью скважин и напряженно-деформированным состоянием на примере трещиноватого коллектора. Тезисы доклада. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2019 г., г. Москва.
3. Konoshonkin D., Churochkin I., Konoshonkina N., Belozarov V., **Zhigulskiy S.** Methodology of stepwise multi-scale stress inversion for predicting fault tectonics and fracturing: case study for prejurassic complex of Tomsk region. Professional geological research and exploration scientific seminar 2019, Progress 2019, Sochi.
4. **Zhigulskiy S.V.** Destabilization of fractures under conditions of reservoir pressure depletion/ 54th U.S. ROCK MECHANICS/GEOMECHANICS SYMPOSIUM, 2020
5. **Zhigulskiy S.V.** Multivariate models of critically stressed fractures and its validation to well completion dataМеждународной конференции «Future Petroleum Engineers forum» 2019 г. Пекин, Китайский нефтяной университет.

Подписано в печать _
Формат 64/84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №
Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 9088