

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В данной работе раскрывается вопрос о применении геомеханического моделирования, для повышения эффективности освоения трещиноватых пород, а именно оценка напряженно-деформированного состояния трещиноватого коллектора с целью определения параметров трещин (активности/ критически напряженного состояния и раскрытости трещин) в околоскважинной зоне. Рассматриваются несколько подходов к исследованию критически напряженного состояния трещин с применением линейного (критерий сухого трения) и нелинейного критериев прочности трещины на сдвиг (критерий Н. Бартона). Описывается исследование напряженного состояния трещин, на примере трещинного коллектора рифейского возраста, в комплексе с данными о продуктивности скважины. Рассматривается один из подходов оценки коэффициента трения трещиноватой породы на основе данных о флюидопроводимости трещин по результатам работы скважин. Детально описывается процесс оценки напряженного состояния пласта и трещины как отдельного элемента в околоскважинном пространстве. Применяемый эмпирический подход находит подтверждение в трехмерном численном моделировании (3D) геомеханического состояния резервуара. Рассматривается система неупорядоченных трещин в поле однородных упругих свойств, параметры трещин такие как жесткость (нормальная и сдвиговая) варьируются для того, чтобы исследовать изменение критически-напряженного состояния и раскрытости, которая определяется по модели Бартона-Бандиса. Разбирается решение задачи о концентрации напряжений в скважине заданной ориентации (задача Кирша), в которой существует трещина заданной ориентации. Результаты расчетов показываются на диаграмме Кулона-Мора, а также в виде синусоиды на изображении имиджера. Для этого была написана программа на языке программирования Python которая позволяет построить синусоиду по наблюдаемой трещине на имиджере, синусоида содержит два атрибута: раскрытость трещины, рассчитанная по модели Бартона-Бандиса и критически напряженное состояние трещины. Данный инструмент был апробирован на двух скважинах, которые вскрывают отложения рифейского комплекса, одна скважина вертикальная (поисково-оценочная) и вторая скважина с горизонтальным окончанием (эксплуатационная).

Цель работы

Проведение параметрического исследования критически напряженного состояния системы трещин по различным критериям прочности с последующим формированием корреляций между данными о продуктивности скважин и геомеханическими параметрами

трещин. Разработать подход по оценке критически напряженного состояния и раскрытости системы трещин в околоскважинной зоне с применением методов геомеханического моделирования.

Основные задачи исследования

Анализ методов оценки критически напряженного состояния трещины по линейному (критерий сухого трения») и по нелинейному критерию (Н. Бартона). Проведение сопоставления результатов моделирования критически-напряженного состояния трещины по указанным критериям и выявление последующих ограничений применяемой модели активации трещины.

Исследовать взаимосвязь между критически напряженным состоянием трещины и данными о флюидопроводимости естественных трещин, по результатам интерпретации специальных геофизических исследований и информации о продуктивности скважины. Рассмотреть возможность решения обратной задачи, а именно определение коэффициента трения трещиноватой породы в скважине на основе допущения о том, что критически напряженные трещины являются флюидопроводящими.

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.

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

Научная новизна

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 описывался в литературных источниках. Следует подчеркнуть, что результаты моделирования показали высокую сходимость с данными пластового микросканера, а именно то, что «видимая» область трещины на имиджере (контраст свойств трещины по отношению к вмещающей породе)

характеризуется большей раскрытостью по модели Бартона-Бандиса, также данная область трещины является критически напряженной.

Сформулированы основные ограничения и неопределенности, связанные с использованием той или иной модели критически-напряженного состояния трещины и модели раскрытости Бартона-Бандиса. На примере трещинного коллектора рифейского возраста выявлено, что большее влияние на продуктивность скважины оказывает длина фрагмента ствола в зоне критически напряженных трещин, количество критически напряженных трещин и результирующее напряжение. Также приведен пример решения обратной задачи по определению коэффициента трения трещины на основе данных о наличии или отсутствии флюидопроводящих трещин в скважине.

Основные 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, приходящегося на зону 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 имеющимися экспериментальными данными. Оценки раскрытия с использованием модели Бартона-Бандиса имеют высокую чувствительность к коэффициенту шероховатости трещины (JRC) и прочности 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.

Теоретическая и практическая значимость работы

Применяемый подход по оценке критически напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне на примере трещинного коллектора нефти и газа позволяет решить ряд задач, связанных с повышением эффективности разработки таких коллекторов и уменьшением рисков поглощения бурового раствора в процессе бурения.

В данной работе показано, что критически напряженное состояние и раскрытость трещины зависит не только от величины и направления главных пластовых напряжений, и ориентации трещины, а также значимым является ориентация ствола скважины и действующие напряжения в околоскважинной зоне. При заданном давлении в скважине трещина будет испытывать различное напряженное состояние. Из этого следует, что, можно провести оценку забойного давления для обеспечения максимальной продуктивности ствола скважины и давления начала поглощения при пересечении ствола скважины трещины в процессе бурения.

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 валидация модели и поиск решений по определению характеристик трещины по модели Бартона-Бандиса, таких как коэффициент шероховатости (JRC), остаточный угол трения по уже имеющимся данным о интерпретации раскрытости трещины по данным FMI (пластовый микроимиджер сопротивления) или знании о интервалах флюидопроводимости по стволу (к примеру, промыслово-геофизические исследования).

Также в данной работе были получены корреляции между коэффициентом продуктивности скважины и геомеханическими параметрами трещин на примере одного из месторождений в Восточной-Сибири. Это позволяет сделать вывод о том, что для прогноза зон перспективных для бурения, в случае трещинных коллекторов, также следует учесть геомеханическую оценку критически напряженного состояния трещин.

По результатам проведенного исследования был зарегистрирован один патент №2728039 (Способ (варианты) и система (варианты) определения траектории бурения скважины) и 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)).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 138 страницы, 74 рисунка, 10 таблиц, два приложения и список литературы из наименований.

Личный вклад

Соискателем был выполнен обзор литературы, анализ существующих подходов к оценке напряженного состояния трещины, проведено сравнение различных критериев прочности трещины на сдвиг, отдельно рассмотрены линейный критерий (критерий сухого трения) и нелинейный критерий (Н. Бартона), 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 флюидопродоводимости пласта, разработан метод прогноза критически напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне и последующего сопоставления с данными микроимиджеровых исследований, проведено численное моделирование трещиноватого пласта для подтверждения ранее выполненных оценок раскрытости системы трещин по модели Бартона-Бандиса.

Апробация работы

По теме работы автором опубликовано 11 печатных работ, из которых 3 статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации, и 4 расширенных тезисов, цитируемых в системе SCOPUS, получен 1 патент на изобретение, зарегистрировано одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

Благодарность

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 конструктивные беседы и кристаллизацию направления работ Овчаренко Ю.В. (ООО «Газпромнефть НТЦ»), за помощь и советы: Лукину С.В., Базырову И.Ш., Митяеву М.Ю. (ООО «Газпромнефть НТЦ»), Дубине Н.В., Баяк И.О., Гарагашу И.А. (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 в реализации одного

из проектов: Рыжикову П., Еремееву А., Максимова Д., Задворнову Д. (Шлюмберже). Автор также благодарит 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..

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** приводится обзор литературных источников по тематике диссертационной работы. Подробно описываются подходы к оценке критически напряженного состояния трещин (раздел 1.), рассматривается линейный критерий прочности (критерий сухого трения и правило Байерли) и нелинейный критерий прочности трещины на сдвиг (критерий Н. Бартона) (раздел 2), описываются методы изучения напряженного состояния пласта (раздел 3) и напряженного состояния в околоскважинной зоне (раздел 4), подробно рассмотрена модель раскрытости Бартона-Бандиса и входящие в нее параметры (раздел 5). Приводятся про- и контраргументы использования того или иного критерия прочности в комбинации с подробным описанием параметров, входящих в модель критически напряженного состояния трещин. Под критически напряженным состоянием трещины далее понимается состояние неустойчивого равновесия, в том смысле, что при малом увеличении сдвигового напряжения, превышающее величину произведения нормального напряжения на коэффициент трения, вдоль плоскости трещины возникнет перемещение [Жигульский и Тихоцкий, 2020].

Критерий сухого трения:

$$\tau \geq 0,6\sigma'_n$$

Критерий прочности трещины на сдвиг (Н. Бартона):

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

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

Правило Байерли:

$$\tau = 0,85\sigma_n \text{ для } \sigma_n \leq 200 \text{ МПа}$$

Во **второй главе** раскрывается вопрос об оценке критически напряженного состояния трещины по различным критериям, рассматривается правило Байерли, критерий сухого трения и критерий прочности трещины на сдвиг Бартона. В целом отмечается, что увеличение коэффициента шероховатости приводит к нелинейному поведению предельной кривой, получается, что в случае $JRC=0$ пределы прочности трещины по критерию сухого трения и критерию Бартона равны (если остаточный угол трения принят углу, соответствующему в критерии сухого трения). В случае, когда предел прочности на сжатие материала стенки трещины (JCS) меньше действующего эффективного нормального напряжения, требуется большее сдвиговое напряжение с ростом JRC для перехода трещины в критически напряженное состояние. Тогда как при пределе прочности на сжатие материала стенок трещины большим чем действующее эффективное нормальное напряжение, минимальным сопротивлением сдвигу характеризуются трещины с большим коэффициентом шероховатости. Предположим, что коэффициент шероховатости не меняется (тем самым морфология поверхности трещины схожая), но трещина в различных породах, в следствие чего предел прочности на сжатие стенок трещины будет разный, в таком случае, трещины с большим JCS будут характеризоваться большим пределом прочности на сдвиг.

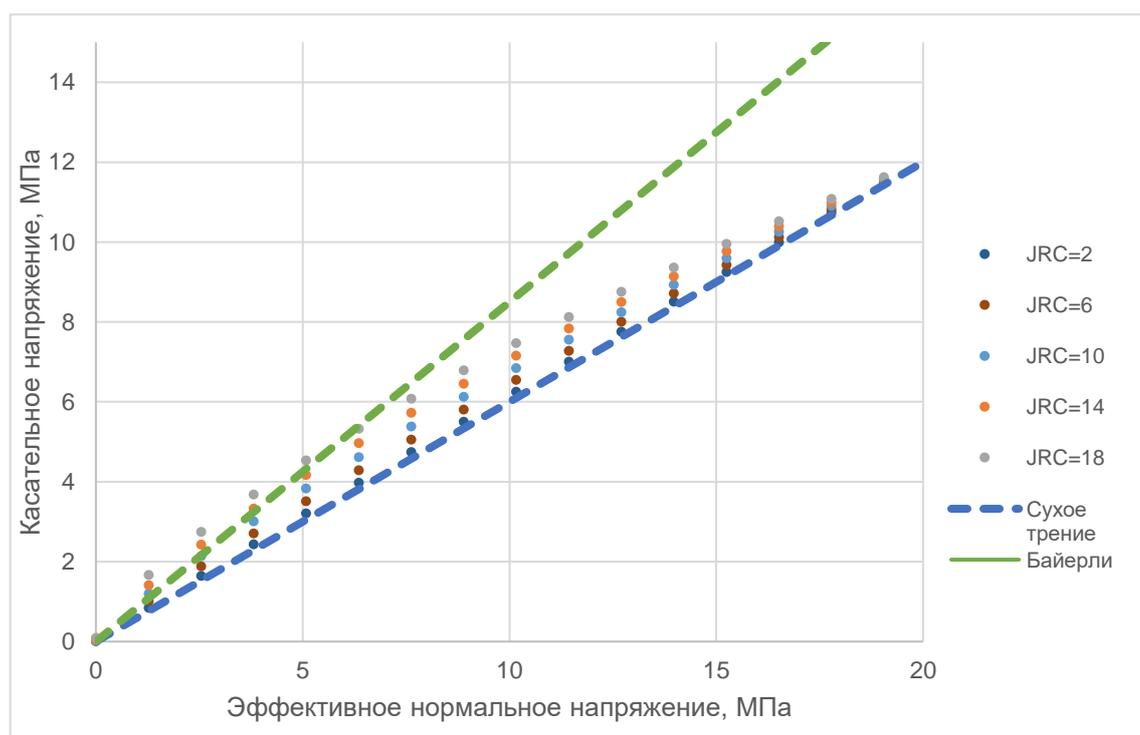


Рисунок 1 График критического касательного напряжения для разных критериев прочности в случае $JCS >$ эффективное нормальное напряжение.

Изучение критически напряженного состояния трещины выполняется для последующего анализа флюидопроводимости трещины. Показано практическое применение подхода к оценке коэффициента трения по скважинным исследованиям на

одном из месторождений Восточной-Сибири на основании концепции того, что критически напряженные трещины являются флюидопроводящими. Приведено описание двух подходов, в первом подходе описывается процесс создания многовариантной геомеханической модели на основе таких параметров как: Q фактор, направление регионального напряжения и угол трения. В данном случае решалась обратная задача, а именно: зная о том какие интервалы в стволе скважины являются флюидопроводящими, можно рассмотреть различные варианты напряженного состояния трещин и выбрать тот, который имеет наибольшую сходимость с данными геофизических исследований. Для итогового варианта был рассчитан такой параметр как FVAL-результатирующее напряжение, среднее значение которого сравнивалось с данными по коэффициенту продуктивности скважины.

$$FVAL = \tau - \sigma_n' t g \varphi$$

Показано, что существует две корреляционные зависимости для прогноза коэффициента продуктивности.

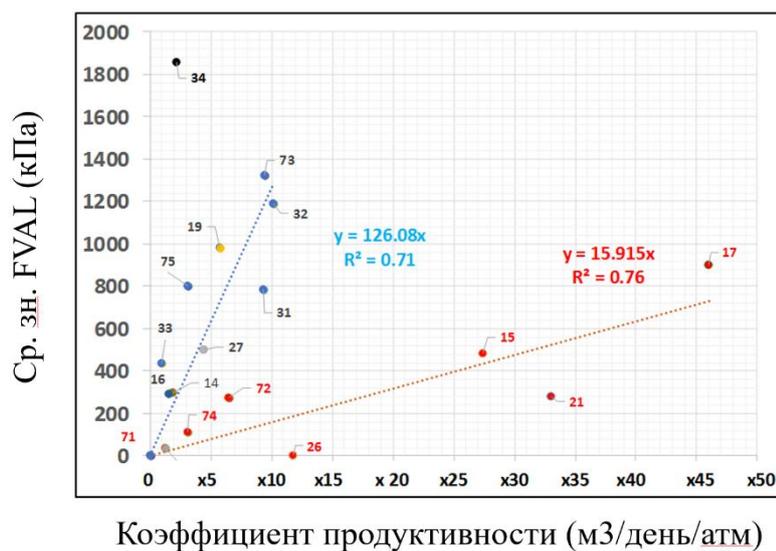


Рисунок 2 График корреляции среднего значения по скважине параметра FVAL и коэффициента продуктивности [Жигульский и др., 2017]

Второй подход заключался в оценке диапазона изменения коэффициента трения. В данном случае рассматривался один тектонический блок, в котором было пробурено две скважины с абсолютно противоположными результатами исследований флюидопроводимости трещин. Результатирующие значения коэффициента трения использовались в критерии прочности для оценки активности трещины. По опорным скважинам (скважины для которых построена 1D геомеханическая модель) исследована зависимость между коэффициентом продуктивности (К) и такими параметрами как: модуль Юнга интервала с критически напряженными трещинами, длина фрагмента ствола в зоне

критически напряженных трещин (L) и количество критически напряженных трещин (N). Выявлено математическое выражение для коэффициента продуктивности через параметры N и L.

$$K = 0.073N + 0.068L \quad R=0.78$$

В главе 3 приводится описание модели Бартона-Бандиса, вводятся такой термин как механическое раскрытие. Основанием для расчета величины раскрытия являются такие параметры как: коэффициент шероховатости трещины (JRC), предел прочности на сжатие стенок трещины (JCS), эффективное нормальное и касательное напряжение, действующие на трещину и остаточный угол трения. Последующие параметры, которые участвуют в расчетах, к примеру: начальная нормальная жесткость (K_{ni}), угол дилатансии, максимальное смыкание стенок трещины (C_m), максимальное сдвиговое перемещение определяются на основе выявленных эмпирических зависимостей. Автор [Barton, 1980] основывается на большой выборке данных, где участвуют различные типы пород. К примеру, для исследования механического раскрытия участвовало более 100 образцов, тогда как исследование сдвига по плоскости разрыва проведены на 650 образцах.

Механическое раскрытие (E):

$$E = E_0 - \Delta V_j + E_d$$

где E_0 – начальное раскрытие, мм; ΔV_j – величину смыкания берегов трещины под действием эффективного нормального напряжения; E_d – величину раскрытия, обусловленной дилатансией, мм.

$$\Delta V_j = \frac{\sigma'_n C_m}{K_{ni} C_m + \sigma'_n}$$

$$E_d = U_s * tg d_m = U_s * tg \left(0.5 * JRC_{mob} * \log \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) \right)$$

$\tau=0$

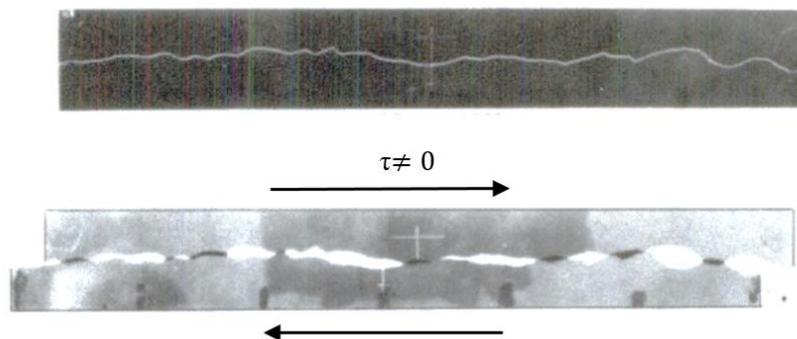


Рисунок 3 Сдвиговое перемещение по плоскости разрыва [Barton and Choubey, 1977]

где U_s –сдвиговое перемещение, мм

d_m -динамический угол дилатансии

JRC_{mob} - динамический коэффициент шероховатости

Так как в модели участвует большое количество параметров был проведен анализ чувствительности к входным данным. Проводимый анализ чувствительности для произвольно ориентированной трещины показал, что максимальная чувствительность механического раскрытия связана с такими параметрами как коэффициент шероховатости трещины, предел прочности на сжатие материала стенок разрыва, величины смыкания берегов трещины и конечно же начального раскрытия, которое является результирующей величиной от коэффициента шероховатости. Получается, что основной параметр, который участвует в расчете всех остальных, является коэффициент шероховатости трещины, который определяется экспериментальным путем. Существует большое разнообразие методов 2D профилирования и 3D сканирования, а также тест «устойчивости» скольжения (tilt test), которые позволяют оценить JRC. В работе [Li and Zhang, 2015] представлены графики с сравнением полученного JRC по различным аналитически зависимостям. Точность определения JRC в большей степени обеспечивает повышение точности оценки механической раскрытости.

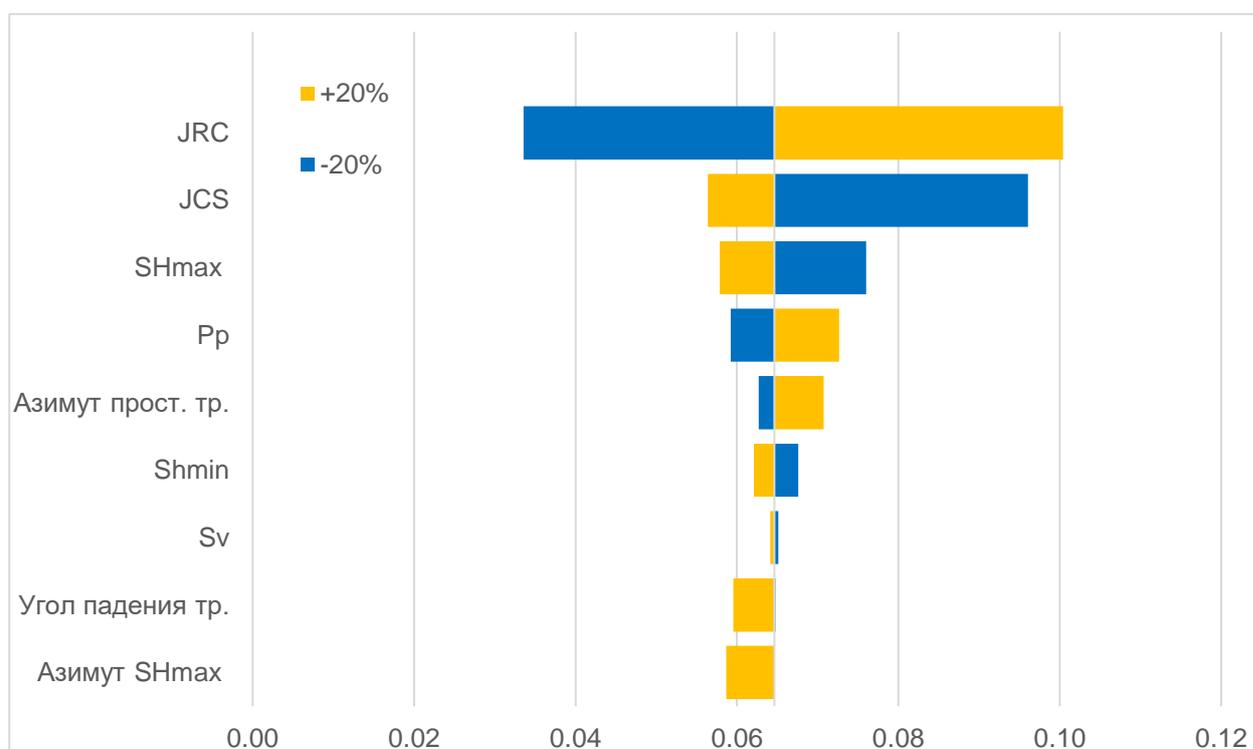


Рисунок 4 Анализ чувствительности свойства механическое раскрытие от параметров: предел прочности на одноосное сжатие (UCS), коэффициент шероховатости (JRC), прочность на сжатие материала трещины (JCS), напряжения: S_v , SH_{max} , Sh_{min} , азимут простирания трещины, азимут SH_{max} , угол падения трещины.

Базовое значение механической раскрытости равно 0,064 мм. Самая высокая чувствительность характерна для параметров: JRC, JCS, ΔV_j (величина смыкания стенок трещины, мм), C_m (максимальное смыкание берегов трещины, мм), E_0 (начальное раскрытие). Такие свойства как JRC_{mob} , E_d , U_{sp} , S_v оказывают незначительное влияние на изменение раскрытости относительно базового значения. К примеру, изменение JRC от 8 до 12 приводит к диапазону по механической раскрытости [0.033-0.101] мм.

Также в **главе 3** рассматриваются результаты построения 3Д конечно-элементной модели в геомеханическом симуляторе. На основе 3Д конечно-элементной модели выполнена оценка напряженно-деформированного состояния системы трещин и проанализировано влияние свойств трещин, таких как начальная жесткость, на минимальное и максимальное горизонтальное напряжение для различных JRC. Для расчета раскрытия трещины использовалась модель Бартона-Бандиса. Для этого были необходимы данные компонент тензора эффективных напряжений и сдвиговых перемещений для трещин по 3Д геомеханической модели. Проведено 9 численных симуляций для сценариев JRC=2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18, отличающихся по параметрам жесткости трещин. Для каждого сценария определены нормальные и сдвиговые напряжения, действующие на плоскость трещины, а также сдвиговые перемещения, которые участвовали в расчете раскрытости. Максимальное механическое раскрытие характерно для JRC=18 и 16 более 0,15 мм. Тем самым модель Бартона Бандиса показывает содержательные оценки раскрытости, которые не противоречат экспериментальным данным.

В **главе 4** подробно описан подход по оценке критически напряженного состояния и раскрытия трещины в околоскважинной зоне, показано сопоставление с данными пластового микросканера по одной из скважин с результатами комплексирования модели критически напряжённых трещин и модели Бартона-Бандиса. Если ранее рассматривалась напряженное состояние трещины в пространстве главных напряжений и результат расчёта отображался на круге Мора в виде точки, то сейчас используются данные о распределении радиального, тангенциального, осевого и касательного напряжения в плоскости θz . 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.

Рассматривая скважина вертикальная и была пробурена с целью изучения свойств трещиноватого карбонатного коллектора рифейского возраста. В скважине были проведены все необходимые исследования для построения геомеханической модели, а именно: акустический широкополосный картаж, запись пластового микросканера,

лабораторные исследования керна по определению упруго-деформационных и прочностных свойств. Эти данные являлись основой для построения профилей действующих пластовых напряжений (S_v , SH_{max} , Sh_{min}).

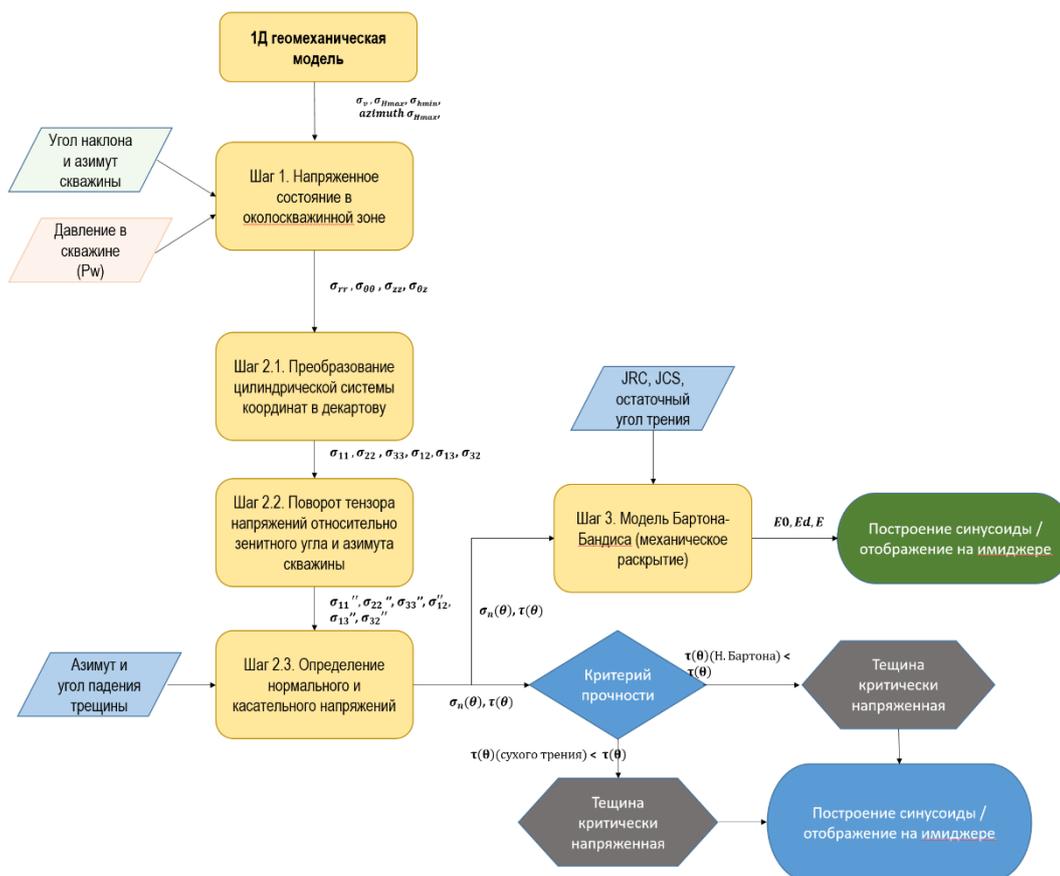


Рисунок 5 Блок-схема по расчету критически напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне

Методику оценки напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне можно пошагово описать следующим образом:

Шаг 1. Напряженное состояние в околоскважинной зоне (напряженное состояние скважины описываем комбинацией из трех нормальных напряжений: σ_{rr} - радиальное напряжение (давление внутри ствола), $\sigma_{\theta\theta}$ - тангенциальное напряжение, еще называется “hoop stress” или кольцевое напряжение, и σ_{zz} - осевое напряжение, и трех касательных напряжений, действующие в разных плоскостях ($\sigma_{\theta z}$, $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rz}))

Шаг 2. Напряженное состояние трещины в околоскважинной зоне (Для расчёта проекций напряжений на площадке трещины необходимо выполнить несколько «разворотов». Так как расположение трещины рассматривается в географической системе координат, нужно перейти от цилиндрической системы координат к декартовой, далее осуществляем два поворота полученного тензора в новой системе координат, один поворот относительно зенитного угла скважины, другой поворот относительно азимута скважины). По результатам данных преобразований получен тензор напряжений в географической

системе координат с учетом ориентации ствола скважины. На основании данных об ориентации трещины можем провести расчет действующих напряжений на плоскость трещины ($\sigma_n(\theta), \tau(\theta)$).

Шаг 3. Критически напряженное состояние трещины в околоскважинной зоне

Критерий сухого трения: если расчетное касательное напряжение \geq критическое касательное напряжение ($\tau(\theta) = 0,6\sigma'_n(\theta)$), тогда 1 иначе 0. (зеленый контур)

Критерий Бартона: если расчетное касательное напряжение \geq критическое касательное напряжение

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

тогда 1 иначе 0. (красный контур)

Шаг 4. Расчет величины раскрытия трещины по модели Бартона-Бандиса

$$E(\theta) = E_o - \Delta V_j(\theta) + E_d(\theta)$$

В результате для заданного угла θ , получаем значение раскрытия в мм, которое можно показать непосредственно на данные сканирования стенок скважины (микроимиджер).

Шаг 5. Визуализация результатов на данные микросканера

Трещина на имиджере отображается в виде некоторой синусоиды, амплитуда которой зависит от угла падения трещины по отношению к ориентации ствола скважины.

Для реконструкции синусоиды необходимо использовать данные кажущегося угла падения и азимута падения, 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:

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

где

avD - фактические данные каверномера, мм

D - номинальный диаметр ствола скважины, мм

На примере трещинного коллектора показаны результаты оценки критически напряженного состояния трещины для критерий сухого трения (Zoback) и для нелинейного критерия при разном JRC.

Таблица 1 Параметры пласта, трещины и скважины для варианта трещины на глубине 2367,7 м

Пласт					
S_v	Sh_{max}	Sh_{min}	P_p	Азимут SH_{max}	Вис/Коэф. Пуассона
МПа	МПа	МПа	МПа	град.	
55,9	34,3	25,6	18,5	110	1/0,13
Трещина					
Азимут пр.	Угол падения	JRC	JCS	$\phi_{ост}$	UCS
228	80	2-8-16	95	33	95
Скважина					
P_w	Азимут	Зенитный угол			
19	0	0			



Рисунок 6 Трещина на глубине 2367,7 м результаты активности/критической напряженности для критериев

Следует отметить факт того, 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. Приведенные выше сопоставления 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.

Попробуем рассмотреть еще несколько примеров, только в данном случае не единичных трещин, а массива данных с множественными трещинами. Разработанная методика позволяет рассчитать весь набор трещин, который ранее был выделен по

результатам интерпретации пластового микросканера. Как ранее уже было отмечено для трещинных коллекторов характерны различные системы трещиноватости.

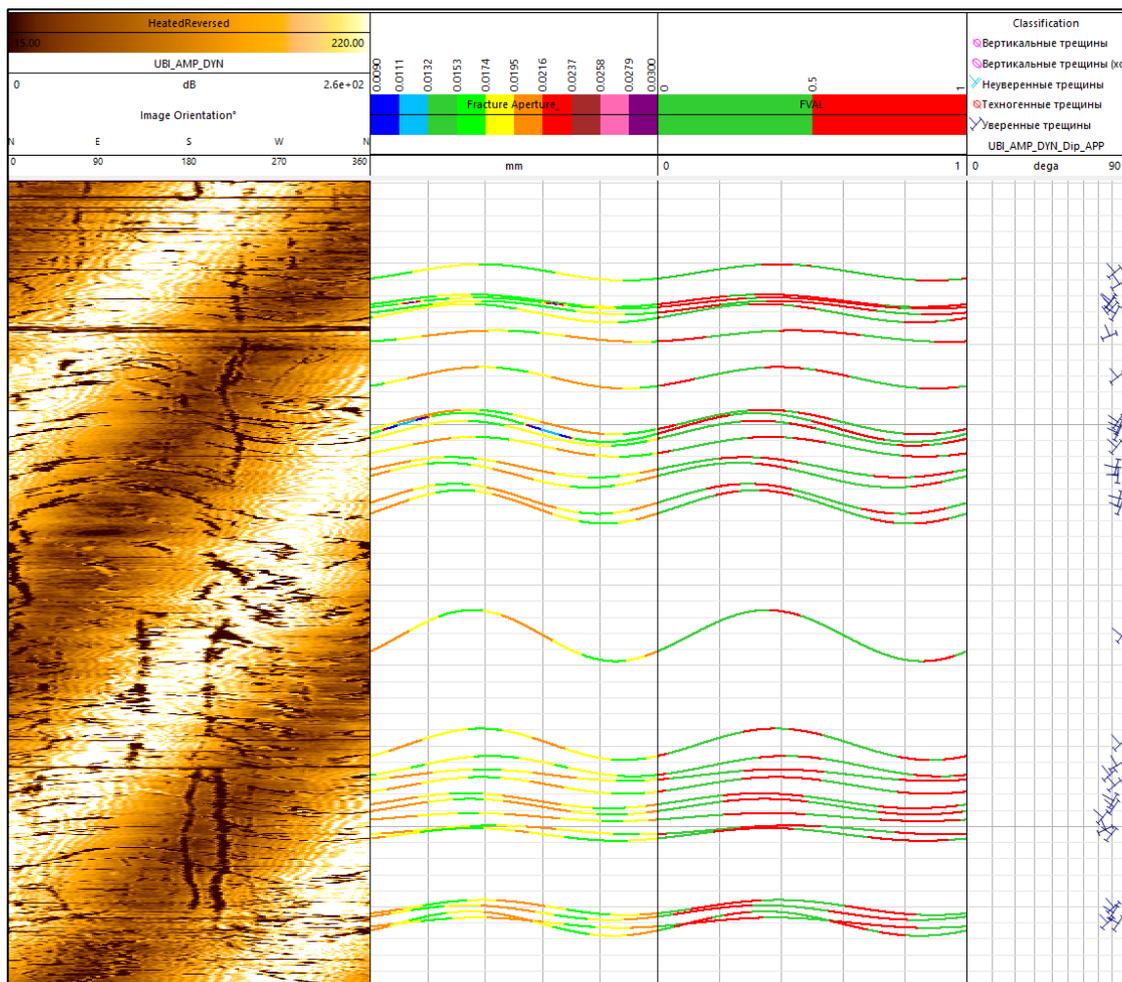


Рисунок 7 Пример расчета раскрытости и критически напряженного состояния трещины в вертикальной скважине при давлении в скважине равным 24 МПа, скважина вертикальная, для трещин JRC=2

Рассмотрим случай вертикальной скважины с давлением внутри ствола 24 МПа и JRC равным 2 (Рисунок 7) и случай когда все параметры такие же, но меняется JRC (JRC =18) (Рисунок 8). Если мы к примеру, оставим давление внутри ствола 24МПа, но увеличим коэффициент шероховатости до 18 (был ранее 2), то увидим значительное увеличение раскрытости, значения меняются в диапазоне 0,01-0,5 мм. Тогда как с точки зрения критически-напряженного состояния трещины изменились незначительно.

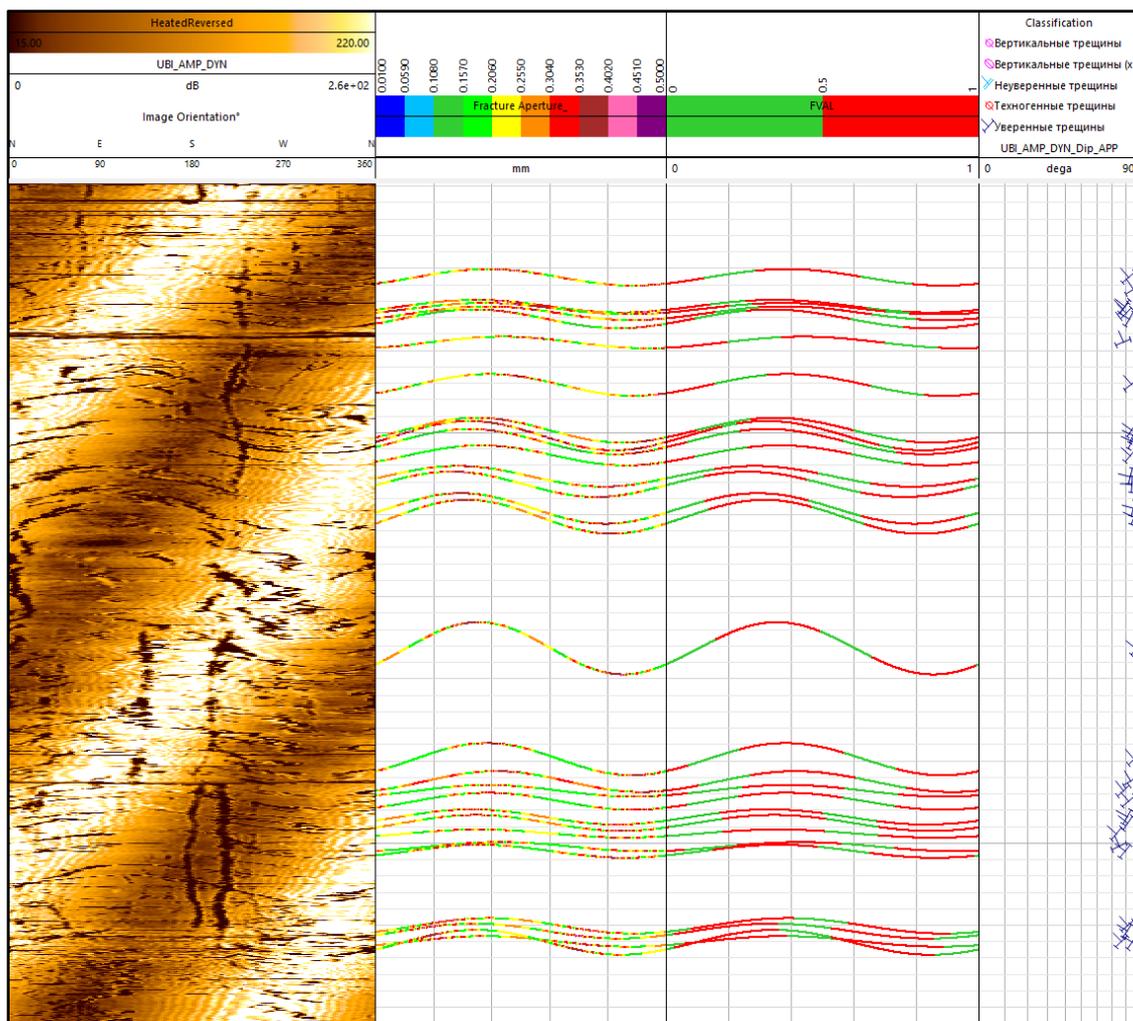


Рисунок 8 Пример расчета раскрытости и критически напряженного состояния трещины в вертикальной скважине при давлении в скважине равным 24 МПа, скважина вертикальная, для трещин JRC=18

В дополнении в работе показано, что несмотря на то, что скважина вертикальная трещины разно ориентированные 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 горизонтальной скважины, показана чувствительность результатов расчета раскрытости при изменении давления внутри ствола и коэффициента шероховатости. В случае горизонтальной скважины большая часть трещин находилась в критически напряжённом состоянии и характеризовалась большим раскрытием.

Продемонстрированный подход расчета напряжений, действующих на трещину и раскрытия будет применен в дальнейшем при расчете критически напряженного состояния трещины на примере трещиноватого коллектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сопоставление между различными критериями прочности трещины на сдвиг (критерий сухого трения, критерий Бартона) с целью оценки критически-напряженного состояния трещины в предположении о том, что критически напряженные трещины являются флюидопродящими. Подробно рассматриваются аргументы и контраргументы использования того либо иного критерия прочности, сделано заключение о том, что нелинейный критерий Бартона дает более пессимистичную оценку критического сдвигового напряжения по плоскости трещины 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 на одном из месторождений Восточной-Сибири. 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 эмпирические зависимости между параметром коэффициент продуктивности и результирующее напряжение (FVAL), длиной фрагмента ствола в области критически напряженных трещин (L) и количеством активизированных трещин. Проиллюстрирован подход по оценке диапазона изменения коэффициента трения на основе данных о флюидопроводимости трещин по скважинам, находящихся в схожих геологических условиях.

Отдельное внимание уделено рассмотрению модели раскрытия Бартона-Бандиса. Сформулированы основные ограничения данной модели на основе выполненного анализа чувствительности к входным параметрам. Выявлено, что максимальная чувствительность механического раскрытия связана с такими параметрами: коэффициент шероховатости трещин, предел прочности на сжатие стенок трещины, начальное раскрытие и величина сжатия берегов трещины. Также проведено численное моделирование трещиноватого массива, по результатам которого получены оценки раскрытия, которые не противоречат экспериментальным данным.

Разработан подход по оценке напряженного состояния и раскрытости трещины в околоскважинной зоне. Показано применение модели Бартона-Бандиса и анализа

критически напряженного состояния трещины при анализе трещин по данным пластового микросканера. По результатам сопоставления отмечается высокая сходимость результатов моделирования и интерпретацией по данным имиджера. Было показано как влияет ориентация ствола и давление внутри ствола на рост области критически напряженных трещин в околоскважинной зоне. Также сильное влияние на раскрытость оказывает коэффициент шероховатости трещины, наблюдается значительный рост раскрытости, что обусловлено начальным раскрытием.

При отсутствии лабораторных исследований параметра JRC и фактических данных о давлении внутри ствола и изображении пластового микросканера, с помощью данного подхода возможно будет найти диапазон значений параметров по модели Бартона-Бандиса, тем самым решая обратную задачу.

Сделан вывод о дальнейшей перспективе применения данного инструмента для оценки напряженного состояния трещиноватых коллекторов в процессе бурения и освоения.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ:

1. 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.
2. Жигульский С.В., Тихоцкий С.А. Оценка раскрытости системы трещин в условиях изменения коэффициента шероховатости трещины на основе данных о напряженно-деформированном состоянии/ УДК 550.8.013// Бурение и нефть 7-8/2020
3. Жигульский С.В., Лукин С.В. Геомеханическое и микросейсмическое сопровождение гидроразрыва пласта в сланцевой формации/ УДК 622.276.66/ Геофизика 4.2018
4. Жигульский С., Ротару А., Курбанов В., Задворнов Д., Максимов Д., Еремеев А., Рыжиков П., 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, Москва
5. 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, Москва
6. Zhigulskiy S.V. Destabilization of fractures under conditions of reservoir pressure depletion/ 54th U.S. ROCK MECHANICS/GEOMECHANICS SYMPOSIUM, 2020
7. 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.
8. Жигульский С.В., Гунькин А.С., Хитренко А.В. Прогноз профиля критической депрессии на примере слабоконсолидированного коллектора. Нефтяное Хозяйство №7/ 2021/ УДК: Б22.27Б.031/ DOI: 10.24887/0028-2448-2021-7-82-85
9. Жигульский С.В. Анализ влияния шероховатости трещины на параметр раскрытости. Тезисы доклада. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2020.
10. 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.