

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Дубини Никиты Владиславовича

«Прямые и обратные задачи изучения естественной трещиноватости методами геомеханики»

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.6.9. – Геофизика

Актуальность темы диссертационного исследования определяется необходимостью развития физически обоснованных методов описания естественной трещиноватости в породах-коллекторах углеводородов, для которых трещинные системы существенно влияют на фильтрацию флюида, эффективные упругие свойства и геомеханическую устойчивость массива. По мере перехода нефтегазовой отрасли к освоению сложнопостроенных, низкопроницаемых и трещиноватых коллекторов возрастает потребность в моделях, позволяющих не только фиксировать параметры трещиноватости по данным геофизических, скважинных и лабораторных исследований, но и прогнозировать их изменение при вариации напряженного состояния, пластового давления и технологических режимов разработки. В этом контексте особенно значимым является установление количественной связи между историей деформирования горных пород, пространственной ориентацией естественных трещин и их флюидопроводимостью.

Не менее актуальной является обратная постановка задачи, связанная с использованием характеристик естественной трещиноватости, как источника информации о современном напряженно-деформированном состоянии геологической среды. Традиционные методы оценки пластовых напряжений и реологических параметров пород нередко требуют существенных априорных допущений, обладают ограниченной применимостью и чувствительны к неопределенности исходных данных. Поэтому разработка геомеханических подходов, позволяющих совместно учитывать данные о трещинах, их флюидопроводимости и статистическом распределении ориентаций, представляет, как фундаментальный интерес для механики трещиноватых сред, так и прикладную значимость для задач бурения, проектирования гидроразрыва пласта, оценки устойчивости ствола скважины, прогноза изменения фильтрационно-емкостных свойств и снижения геомеханических рисков при разработке месторождений нефти и газа.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 128 иллюстраций и 6 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 339 страниц, список использованной литературы включает 333 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта новизна полученных результатов, их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, а также аргументирована обоснованность и достоверность результатов и выводов, приведены сведения о публикации полученных результатов.

В первой главе представлен анализ существующих подходов к построению моделей естественной трещиноватости при изучении и разработке месторождений углеводородов. В ней приведены основные принципы использования геологических, статистических и геомеханических моделей трещиноватости, а также охарактеризованы их преимущества, ограничения и области применимости. Рассмотрены возможности комплексирования разномасштабных геофизических данных, методов петроупругого моделирования и геомеханического анализа для прогноза положения, ориентации и флюидопроводимости естественных трещин. Особое внимание уделено обоснованию необходимости перехода от статического описания трещинных систем к моделям, учитывающим напряженно-деформированное состояние массива и историю его изменения.

Вторая глава посвящена разработке математической модели, связывающей неупругое деформирование горных пород с формированием и пространственной ориентацией естественных трещин сдвига. В главе рассмотрены условия псевдотрехосного нагружения образцов горных пород и приведены основные положения неассоциированного закона пластического течения с упрочнением по углу внутреннего трения. Охарактеризован алгоритм определения преимущественных направлений развития трещиноватости и оценки ее интенсивности с учетом энергетических характеристик деформирования и индекса хрупкости. Также приведены результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования, подтверждающие возможность использования предложенного подхода для прогноза параметров трещиноватости. Показано, что изменение текущего угла внутреннего трения при накоплении необратимых деформаций позволяет определить

преимущественный угол формирования сдвиговых трещин относительно направления максимального главного напряжения. Предложена энергетическая оценка относительной интенсивности трещинообразования, учитывающая долю энергии, расходуемой на образование новых поверхностей разрыва, и хрупкость породы. Сопоставление расчетных полей деформаций с результатами ультразвукового сканирования образцов подтвердило связь между локализацией неупругих деформаций, развитием трещиноватости и изменением динамических упругих свойств горной породы.

Полученные в главе результаты доказывают первое защищаемое положение.

Третья глава посвящена геомеханическому описанию флюидопроводимости естественных трещин сдвига в заданном поле напряжений. В ней рассмотрены условия, при которых естественные трещины могут переходить в состояние критической напряженности и обеспечивать фильтрацию флюида, а также приведено аналитическое решение задачи определения всех возможных пространственных ориентаций таких трещин для произвольного тензора напряжений. Охарактеризовано влияние основных геомеханических факторов – соотношения главных напряжений, ориентации их осей, коэффициента трения, глубины залегания, давления флюида, положения скважины и близости крупных разломов – на количество и ориентационное распределение флюидопроводящих трещин. Показано, что флюидопроводимость естественной трещиноватости определяется не только самим фактом наличия трещин, но и их согласованностью с современным напряженным состоянием массива: при изменении напряжений или порового давления одна и та же система трещин может существенно менять свою гидродинамическую роль.

В качестве одного из ключевых результатов получено аналитическое описание области допустимых ориентаций критически напряженных трещин без введения априорных ограничений на тип напряженного состояния, что расширяет применимость подхода по сравнению с традиционными схемами, основанными на упрощенных предположениях о главных напряжениях. Рассмотрены закономерности поведения флюидопроводящих трещин на разных глубинах, в околоскважинной зоне и в окрестностях разломов, сделан вывод о существенном влиянии локальной концентрации напряжений и техногенного изменения давления на активацию трещин. Отдельно разработан вероятностный подход, в рамках которого доля критически напряженных

трещин трактуется, как индикатор флюидопроводимости системы трещиноватости, с учетом статистического распределения трещин по ориентациям. Это позволило перейти от детерминированного выделения отдельных проводящих трещин к вероятностной оценке флюидопроводимости трещинного ансамбля, что особенно важно при работе с геофизическими данными, содержащими неопределенности и характеризующими трещиноватость в осредненном виде.

Полученные в главе результаты доказывают второе и третье защищаемое положение.

Четвертая глава посвящена объединению разработанных в предыдущих главах подходов в единый алгоритм построения геомеханически согласованной модели естественной трещиноватости. В ней рассмотрены принципы интеграции разномасштабных геофизических данных, результатов петроупругого и геомеханического моделирования, а также информации о напряженно-деформированном состоянии массива и истории накопления необратимых деформаций. Приведены этапы построения модели, позволяющей оценивать положение, пространственную ориентацию, относительную интенсивность и флюидопроводимость естественных сдвиговых трещин. Охарактеризован вероятностный подход, в рамках которого каждый элемент трехмерной геомеханической модели описывается не только параметрами трещиноватости, но и вероятностью нахождения в нем критически напряженных, а, следовательно, потенциально флюидопроводящих трещин. Показано, что предложенный алгоритм может быть включен в стандартный цикл трехмерного геомеханического моделирования без существенного увеличения вычислительных затрат, поскольку ключевые зависимости имеют аналитическую или полуаналитическую форму. На примере участка месторождения углеводородов продемонстрировано, что изменение пластового давления приводит к пространственно неоднородной перестройке вероятности флюидопроводимости трещин, причем наиболее выраженные зоны критически напряженной трещиноватости приурочены к приразломным областям. Сделан вывод, что не все тектонические нарушения одинаково влияют на развитие и гидродинамическую значимость трещиноватости: степень их проявления определяется ориентацией разломов относительно действующего поля напряжений и характером изменения давления флюида. Разработанный подход создает основу для генерации синтетических систем трещин и последующего построения дискретных моделей трещиноватости, согласованных с

геомеханическим состоянием массива и пригодных для использования в гидродинамическом моделировании.

Пятая глава посвящена постановке обратной задачи геомеханического описания естественной трещиноватости и анализу методов реконструкции напряженного состояния массива горных пород по скважинным и лабораторным данным. В ней рассмотрена роль одномерного геомеханического моделирования в задачах изучения напряженно-деформированного состояния пород околоскважинной зоны, а также охарактеризованы основные подходы к восстановлению профилей вертикального и горизонтальных напряжений. Приведены традиционные модели оценки горизонтальных напряжений – пороупругая и линейная, показаны их преимущества и ограничения при применении к слоистым геологическим средам. Особое внимание уделено разработке слоистой модели, в которой распределение напряжений определяется с учетом контраста упругих свойств соседних слоев и условий механической совместности на их границах.

В главе получены аналитические соотношения, связывающие компоненты тензора напряжений в соседних линейно-упругих слоях с различными упругими модулями. Показано, что в рассматриваемой постановке переход через границу слоев приводит к скачкообразному изменению величин напряжений, но не вызывает поворота направлений главных горизонтальных напряжений. Рассмотрены обобщения модели для трансверсально-изотропных сред и случаев, когда ось симметрии анизотропии не совпадает с нормалью к границе слоев. Сделан вывод, что для восстановления напряженного состояния слоистой среды необходимо совместно использовать данные об упругих свойствах пород и независимые оценки отдельных параметров напряженного состояния, получаемые геофизическими методами. Также показано, что существующие скважинные методы – интерпретация гидроразрыва и тестов на приемистость, анализ вывалов и трещин растяжения, оценка анизотропии динамических упругих модулей и лабораторные исследования керна – обладают различными ограничениями, поэтому наиболее надежная реконструкция напряжений требует их комплексирования и привлечения дополнительных индикаторов, включая данные о естественной трещиноватости.

Полученные в главе результаты доказывают четвертое защищаемое положение.

Шестая глава диссертационной работы посвящена разработке и исследованию алгоритма реконструкции напряженного состояния горных пород по данным о естественной трещиноватости и ее флюидопроводимости. В ней рассмотрена методология использования геофизических индикаторов проводимости трещин, как дополнительного источника информации о действующих напряжениях, а также приведена последовательность решения обратной задачи, основанная на сопоставлении фактически выделенных флюидопроводящих трещин с трещинами, которые должны находиться в критически напряженном состоянии в поле приложенных напряжений. Охарактеризованы этапы алгоритма: разбиение интервала исследования на участки, содержащие отдельные трещины, назначение индексов аномальности по геофизическим данным, расчет индексов критичности на основе критерия Кулона-Мора, выбор целевой функции и поиск таких управляющих параметров, при которых достигается наилучшее соответствие между наблюдаемой и расчетной флюидопроводимостью трещин. Особое внимание уделено формулировке целевых функций и статистической интерпретации решения обратной задачи.

В главе показано, что задача реконструкции напряжений может быть сведена к оптимизационной процедуре, в которой решение определяется максимумом меры согласованности между геофизическими признаками проводимости трещин и их расчетной критической напряженностью. Рассмотрены различные варианты целевых функций, включая функции, основанные на углах между многомерными векторами индексов аномальности и критичности. Выполнено обобщение алгоритма на случай совместной реконструкции полного тензора напряжений и коэффициента трения трещиноватой среды без предварительного задания типа напряженного состояния. Для этого использована параметризация через форму эллипсоида напряжений, отношение максимального и минимального главных напряжений и углы Эйлера, задающие ориентацию главных осей. На синтетических моделях показано, что предложенный подход сохраняет устойчивость при реалистичном уровне ошибок в интерпретации флюидопроводимости трещин и позволяет учитывать неоднозначность решения в терминах математической статистики, что принципиально важно для применения метода к зашумленным геофизическим данным.

Полученные в главе результаты доказывают пятое защищаемое положение.

В седьмой главе представлены результаты апробации разработанного алгоритма реконструкции напряженного состояния и коэффициента трения трещиноватых горных пород на фактических геофизических данных. В ней рассмотрены три различных по геологическим условиям объекта: исследовательские скважины в районе желоба Нанкай, скважины геотермального поля Ротокава и нефтегазовое месторождение в Республике Татарстан. Приведены результаты решения обратной задачи с использованием данных о пространственной ориентации и флюидопроводимости естественных трещин, полученным по материалам геофизических исследований скважин. Охарактеризована процедура статистического анализа множества допустимых решений, полученных методом Монте-Карло, включая выбор порогового значения целевой функции, оценку неопределенности параметров напряженного состояния и анализ эквивалентности решений.

Установлено, что информация о флюидопроводимости естественных трещин действительно может быть использована для восстановления относительных величин главных напряжений, направлений их действия и коэффициента трения трещиноватой среды. Для скважин в районе желоба Нанкай установлено количественное согласие реконструированных напряжений с независимыми оценками, полученными по данным о вывалообразовании, испытаниям на приемистость и лабораторным исследованиям керна. На данных геотермального поля Ротокава продемонстрирована возможность вероятностного описания параметров напряженного состояния при большом объеме информации о трещинах. При этом выявлена значимая неопределенность в ориентации части главных осей и показана необходимость статистической интерпретации результатов. Для месторождения в Республике Татарстан рассмотрен случай ограниченного объема данных о трещиноватости, что позволило сформулировать критерии выбора порогового значения целевой функции и показать целесообразность применения распределений семейства Пирсона для описания асимметричных и неоднородных распределений решений обратной задачи. В целом сделан вывод, что предложенный метод дает результаты, сопоставимые с независимыми геофизическими оценками напряжений, и может рассматриваться как дополнительный инструмент снижения неопределенности геомеханических моделей трещиноватых коллекторов.

В заключении на основе полученных решений поставленных задач сформулированы основные выводы.

Список публикаций автора диссертационной работы **отражает** основные теоретические и практические результаты работы, **обосновывает** основные защищаемые положения. Автореферат диссертации по своему содержанию полностью соответствует основным идеям диссертации.

Научная новизна результатов работы состоит в развитии нового геомеханического подхода к прямому и обратному анализу естественной трещиноватости, позволяющего связать параметры систем трещин, их флюидопроводимость и напряженно-деформированное состояние массива горных пород в единой вероятностно-механической постановке.

Результаты, обосновывающие научную новизну:

- предложена модель формирования естественных сдвиговых трещин при накоплении неупругих деформаций, основанная на неассоциированном законе пластического течения с упрочнением по углу внутреннего трения и позволяющая прогнозировать пространственные ориентации трещин;
- получено аналитическое решение задачи определения возможных ориентаций флюидопроводящих естественных трещин сдвига для произвольного тензора напряжений без предварительного задания типа напряженного состояния;
- сформулирован вероятностный критерий оценки флюидопроводимости трещинного ансамбля, связывающий долю критически напряженных трещин с текущим полем напряжений, коэффициентом трения и статистическим распределением трещин по ориентациям.
- разработан алгоритм обратной реконструкции параметров напряженного состояния и коэффициента трения по данным о пространственной ориентации и флюидопроводимости естественных трещин.
- выполнена верификация предложенных подходов на лабораторных экспериментах, синтетических моделях и фактических данных по объектам различной геологической природы, включая зону субдукции, геотермальное поле и нефтегазовое месторождение.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в развитии геомеханических представлений о связи между естественной трещиноватостью, неупругим деформированием и напряженно-деформированным состоянием горных пород. В работе предложены математические модели и алгоритмы, позволяющие описывать формирование, пространственную ориентацию и флюидопроводимость сдвиговых трещин в рамках механики сплошных сред с учетом статистической неоднозначности

исходных данных. Существенным теоретическим результатом является также алгоритм решения обратной задачи восстановления параметров напряженного состояния и реологических свойств трещиноватой среды на основе данных о естественных флюидопроводящих трещинах.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения разработанных подходов при построении геомеханических и гидродинамических моделей трещиноватых коллекторов нефти и газа. Полученные алгоритмы позволяют уточнять распределение флюидопроводящих трещин, оценивать напряженное состояние массива и прогнозировать изменение фильтрационных свойств пород при разработке месторождений. Результаты могут использоваться для оптимизации траекторий бурения, расчета устойчивости ствола скважины, проектирования гидроразрыва пласта и снижения геомеханических рисков. Дополнительное значение имеет возможность применения предложенных методов к объектам с ограниченным объемом прямых данных о напряжениях за счет использования информации о естественной трещиноватости.

Результаты, полученные Н.В. Дубиней, обладают несомненной значимостью, как с фундаментальной, так и практической точки зрения, так как вносят существенный вклад в развитие современной геомеханики коллекторов нефти и газа.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечиваются использованием строгого математического аппарата механики сплошных сред, теории эффективных сред, методов статистического анализа и решения обратных задач. Корректность разработанных моделей подтверждена результатами лабораторных экспериментов на образцах горных пород, численным моделированием процессов неупругого деформирования и сопоставлением расчетных характеристик с данными ультразвуковых исследований. Достоверность предложенных алгоритмов реконструкции напряженного состояния обоснована их проверкой на синтетических моделях и применением к фактическим геофизическим данным по объектам различной геологической природы. Полученные результаты согласуются с независимыми оценками напряжений, выполненными по данным скважинных исследований, испытаний на приемистость, анализа вывалов и лабораторных исследований керна.

Дополнительным свидетельством достоверности основных положений работы служит их широкая апробация на всероссийских и международных конференциях (включая конференции AGU, JpGU, ARMA и EAGE) и отражение основных результатов в 21 научной публикации в рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Замечания по работе носят рекомендательный характер и не влияют на общее положительное впечатление от работы:

1. В разделе 2.2 при описании программы экспериментальных исследований и далее при анализе полученных данных многоуровневого ультразвукового сканирования негласно принята гипотеза об эквивалентности состояния трещиноватости в момент действия приложенных напряжений и момент после разгрузки. Необходимо пояснить какие эмпирические или иные данные указывают на правомочность принятия этой гипотезы.
2. Из текста этого же раздела не ясно, учитывалась ли жесткость нагружающей машины при построении кривых деформирования и каким образом.
3. В параграфе 2.2.5 указано, что в качестве параметра, связывающего изменения скоростей упругих волн с накопленными деформациями предлагается использовать интенсивность пластических деформаций сдвига (соотношение 2.2.15). Не ясно, почему игнорируется влияние на скорость упругих волн шаровой части необратимых деформаций, связанной с дилатансией.
4. В параграфе 2.2.6, посвященном интерпретации результатов экспериментов в терминах параметров трещиноватости, представлены распределения микротрещин по ориентации для различных стадий неупругого деформирования. Возникает вопрос, проводилась ли верификация этих результатов с использованием каких-либо методов неразрушающего контроля (оптическая микроскопия, томография и т.д.).
5. В параграфе 2.3 предложена новая нормировка индекса хрупкости. В тексте не обсуждаются границы применимости такого индекса. Могут ли сравниваться между собой по степени хрупкости два материала, имеющих различную исходную анизотропию упругих и прочностных свойств.

6. Раздел 3.2 посвящен определению пространственных ориентаций флюидопроводящих сдвиговых трещин в окрестности разломов различного кинематического типа. На рис. 3.2.27 приведены зависимости доли флюидопроводящих трещин от расстояния до разлома при различной его ориентации, а на других рисунках стереограммы с указанием областей нормалей к таким трещинам. При этом нигде не учтен тот факт, что в зависимости от кинематического типа разлома в его окрестности имеют место не равновероятно ориентированные трещины, а трещины сдвига 1-2 преимущественных ориентаций.
7. В разделе 4.3 на рисунках 4.3.1 и 4.3.2 представлены пространственные распределения относительного количества критически напряженных трещин для одного из месторождений при реализации различных технологических операций. При этом почти на всех рисунках проявляется сеть разломов различного ранга. В тексте этого раздела отсутствует информация о том, каким образом учитывалась априорная информация об ориентациях и кинематике разломов на рассматриваемом участке.

Общая оценка работы.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.9. «Геофизика» (физико-математические науки).

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации можно сделать заключение, что диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема разработки геомеханически обоснованных методов прямого прогноза параметров естественной трещиноватости и обратной реконструкции напряженно-деформированного состояния трещиноватых массивов горных пород по данным о пространственной ориентации и флюидопроводимости естественных трещин, имеющая важное значение, как для развития фундаментальных представлений механики трещиноватых геосред, так и для решения прикладных задач повышения эффективности и безопасности освоения и разработки нефтяных и газовых месторождений.

Считаю, что диссертация «Прямые и обратные задачи изучения естественной трещиноватости методами геомеханики» соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней

(утверждено Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), а ее автор, Дубиня Никита Владиславович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9. «Геофизика».

Я, Пантелеев Иван Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета Д 24.1.132.01, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией цифровизации горнотехнических процессов «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (1.1.8 Механика деформируемого твердого тела)

Сведения об организации: 614090, г. Пермь, ул. Ленина, 13а; (342) 212-60-08; psc@permisc.ru; <http://www.permisc.ru>

30.09.2026

Пантелеев Иван Алексеевич
pia@icmm.ru, +7 (342) 23783117

