

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИПМех РАН
Чл.-корр. РАН Якуш С.Е.
«05» 10 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе

Дубини Никиты Владиславовича

«Прямые и обратные задачи изучения естественной трещиноватости методами геомеханики», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9. – Геофизика

Диссертационная работа Н.В. Дубини относится к области геомеханики месторождений углеводородов. Основным объектом исследования являются горные породы с развитой естественной трещиноватостью. Рассматриваются задачи прогноза свойств естественных трещин по результатам изучения полей природных напряжений и задачи оценки напряжений и отдельных реологических свойств горных пород по сведениям об их естественной трещиноватости.

Актуальность темы выполненной работы обусловлена возрастающей ролью месторождений углеводородов с развитой трещиноватостью пород-коллекторов в современном топливно-энергетическом комплексе. В данный момент все чаще в разработку вводятся породы с низкими фильтрационно-емкостными свойствами матрицы, однако с выраженными естественными трещинами, обеспечивающими пути для фильтрации флюида. Для того, чтобы повысить эффективность и безопасность освоения и разработки месторождений, сложенных такими породами, необходимо развитие методов интерпретации самих геофизических данных и результатов их интерпретации. В то же время в последние годы активно развивается направление применения методов механики деформируемого твердого тела и механики микронеоднородных сред для решения задач геомеханики месторождений углеводородов. Рассматриваемая диссертационная работа находится на стыке этих двух направлений, что определяет ее актуальность.

Цель и задачи исследования

В качестве основной цели исследования соискатель устанавливает повышение эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами – коллекторами, обладающими ярко выраженной естественной трещиноватости.

Для достижения поставленной цели соискателем решаются следующие задачи:

1. Создание математического аппарата, позволяющего использовать результаты лабораторных исследований механических свойств горных пород для определения положений и пространственных ориентаций естественных трещин сдвига, образующихся в геологической среде при накоплении в ней неупругих деформаций.

2. Создание математического аппарата, позволяющего определять пространственные ориентации трещин, являющихся флюидопроводящими в текущем поле напряжений, а также

оценивать флюидопроводимость на вероятностном уровне с возможностью учета неоднозначности в исходных данных, используемых для прогноза.

3. Создание математического аппарата, позволяющего реконструировать подчиняющееся основным законам механики поле напряжений в слоистой линейно упругой среде с возможной анизотропией по данным точечных оценок отдельных параметров ее напряженного состояния.

4. Создание подхода к совместной реконструкции компонент тензора напряжений (без использования априорных предположений о его виде) и отдельных реологических свойств элемента геологической среды по данным о представленных в нем естественных трещинах и их флюидопроводимости.

5. Исследование существования, единственности и устойчивости решения обратной задачи оценки напряженного состояния среды по данным о естественной трещиноватости.

6. Верификация разработанных подходов и алгоритмов путем их применения к реальным данным. Прямые задачи (1 – 2): проведение специальных лабораторных экспериментов и подтверждение корректности результатов моделирования свойств трещиноватости косвенными методами; обратные задачи (3 – 5): реконструкция напряженного состояния по данным фактических скважинных исследований на разных объектах и сравнение отдельных параметров, поддающихся оценке разными методами, с независимыми исследованиями.

Цель диссертации и решаемые задачи соответствуют современным тенденциям геофизических исследований, направленных на изучение геологических сред, характеризующихся неоднородной внутренней структурой, и их механическое поведение.

Структура работы

Диссертационная работа соискателя состоит из введения, семи основных глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертационного исследования, дает краткое описание степени разработанности темы исследования, устанавливает цель работы и ее задачи, формулирует научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, описывает методологию и методы исследования, формулирует выносимые на защиту положения, обосновывает достоверность результатов.

Автор делит свою работу на две основные части. Первая часть относится к прямым задачам прогноза свойств трещиноватости по результатам геомеханических исследований, включая моделирование. Первая часть состоит из первых четырех основных глав. Вторую часть автор относит к обратной задаче оценки напряженного состояния и отдельных реологических свойств геологической среды по данным о естественной трещиноватости. Вторая глава содержит заключительные три главы диссертации.

В первой главе автор дает краткий литературный обзор современного состояния использования различных геофизических данных о естественных трещинах в геологических средах. Автором упомянута классификация существующих методов на категории геологических моделей естественной трещиноватости, статистических моделей и моделей, основанных на результатах геомеханического моделирования. Отдельно рассмотрены эффективные свойства пород, содержащих системы естественных трещин, описаны некоторые подходы петроупругого моделирования. По результатам анализа текущего состояния исследований сформулированы основные цели первой части работ и определена прямая задача описания естественной трещиноватости: разработка математического аппарата,

который позволяет использовать данные, полученные в результате проведения разномасштабных геофизических исследований трещиноватых горных пород, для определения положений, пространственных ориентаций, отдельных геометрических параметров и флюидопроводимости естественных трещин, а также давать прогноз изменения указанных параметров при эволюции состояния среды.

Вторая глава полностью посвящена вопросу прогноза положений и пространственных ориентаций естественных трещин, развивающихся в геологической среде при накоплении необратимых деформаций. В главе описана математическая модель, основанная на модели пластического деформирования с упрочнением по коэффициенту трения, которая позволяет прогнозировать, под какими углами к осям главных напряжений развиваются сдвиговые трещины при накоплении деформаций. Автором предложен переход от интенсивности накопленных деформаций сдвига к относительному количеству трещин различных пространственных ориентаций с использованием энергетического подхода, учитывающего хрупкость породы. Математическая модель применена для описания изменения внутренней структуры цилиндрических образцов горных пород, подверженных простому псевдотрехосному нагружению. Достоверность моделирования подтверждена результатами специальных ультразвуковых исследований. Кроме того, в главе представлены результаты численного моделирования с использованием сформулированной модели неупругого деформирования. Отдельно можно отметить предложенный подход к нормировке индекса хрупкости.

Третья глава нацелена на дальнейшее исследование свойств естественной трещиноватости. Если в предыдущей главе предложена модель, позволяющая прогнозировать положения и пространственные ориентации трещин в элементе горной породы, для которой известна история изменения напряженно-деформированного состояния. В первой части главы описано аналитическое решение, позволяющее определить все возможные пространственные ориентации сдвиговых трещин, являющихся флюидопроводящими в заданном поле напряжений без априорных предположений о его виде. Это решение далее использовано для анализа ряда теоретических задач, а также апробировано на фактических данных. Далее рассмотрен вопрос его применения к реальным трещиноватым средам, отличающимся неравномерным распределением трещин по пространственным ориентациям. Предложена полуаналитическая методика определения вероятности того, что случайно выбранная трещина из заданного ансамбля является флюидопроводящей в определенном поле напряжений. Решение подкреплено разбором ряда аналитических примеров.

Модели, разработанные во второй и третьей главах, объединены в четвертой главе, завершающей первую часть диссертации. В этой главе предложен пошаговый алгоритм реконструкции положений, пространственных ориентаций и флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин в массиве горных пород, для которого определена динамика изменения напряженно-деформированного состояния, в частности, применительно к случаю разработки месторождения углеводородов. Показаны преимущественные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин на разных этапах разработки месторождения, результаты моделирования подкреплены обезличенными данными по работе скважин на конкретном участке.

Вторая часть диссертации посвящена обратной задаче реконструкции природных напряжений по сведениям о фактической флюидопроводимости естественных трещин сдвига. Она состоит из трех глав.

В пятой главе диссертации представлена постановка задачи одномерного

геомеханического моделирования – реконструкции зависимостей главных напряжений и направлений их действия вдоль траектории скважины. В работе представлена обзорная часть с описанием постановки задачи, существующих методов ее решения и источников информации о напряжениях, в разной степени активно используемых на практике геомеханики месторождений углеводородов. Далее представлено авторское решение задачи о скачке напряжений в слоистой линейно-упругой среде при переходе границы между слоями. Автор рассматривает постановки разной степени сложности и формулирует алгоритм реконструкции напряжений для слоистой среды, указывая, что этот алгоритм занимает компромиссную позицию между общепринятыми подходами.

Шестая глава занимает центральное место второй части диссертации с точки зрения методологии. В ней представлена постановка обратной задачи реконструкции профилей напряжений по сведениям о флюидопроводимости естественных трещин в окрестности скважин. Сформулирована задача оптимизации, определена целевая функция, заданы диапазоны изменения искоемых параметров. Предложен поэтапный алгоритм реконструкции напряжений в двух вариантах: базовом, при котором используется предположение о субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений, и расширенном, в котором предположения о виде напряженного состояния отсутствуют, а совместно с реконструкцией напряжений выполняется и определение коэффициента трения среда. Для базового случая с использованием синтетических данных детально рассмотрены вопросы области эквивалентности решений обратной задачи. Подобная работа проведена и для расширенного случая, в котором рассмотрение ограничено вопросами чувствительности решения к зашумлению исходных данных.

В заключительной главе основной части диссертации соискатель приводит примеры успешного применения предложенного подхода к решению задачи реконструкции напряжений по реальным данным для трех различных регионов. Рассмотрены отдельные вопросы факторного анализа, возможности совместного восстановления и компонент тензора напряжений, и коэффициента трения, результаты верифицированы путем сравнения с независимыми исследованиями. В главе получен ряд результатов, имеющих региональную значимость (оценка напряжений в потенциально сейсмоопасной зоне, на геотермальном поле и для нефтегазового месторождения).

В заключении автор повторяет положения, выносимые на защиту, и приводит их обоснование. Также соискатель обсуждает потенциальные направления дальнейших исследований.

Достоверность результатов исследования подтверждена реализацией комплексной программы лабораторных исследований, дополненной численным моделированием, подтверждающей применимость разработанных моделей для описания экспериментальных данных (глава 2); независимой верификацией прогноза флюидопроводимости естественных трещин фактическими данными геофизических исследований скважин (глава 3) и промысловыми данными (глава 4); воспроизводимостью верного решения обратной задачи на синтетических данных (глава 6); соответствием полученных решений обратных задач независимыми реконструкциями напряжений, полученными общепринятыми методами и опубликованными в литературе (глава 7).

Научной новизной обладают следующие результаты работы:

1. Модель прогноза положений и пространственных ориентаций трещин в элементе

- геологической среды по истории изменения ее напряженно-деформированного состояния;
2. Методика нормировки индекса хрупкости и переход от интенсивности накопленных деформаций сдвига к интенсивности естественной трещиноватости;
 3. Аналитическое решение задачи о поиске всех возможных пространственных ориентаций флюидопроводящих трещин в заданном поле напряжений и результаты его применения для ряда задач;
 4. Полуаналитическая модель определения вероятности случайно выбранной трещины из ансамбля быть флюидопроводящей;
 5. Алгоритм определения геометрических и транспортных свойств естественных сдвиговых трещин по результатам геомеханического моделирования, в том числе, связанного с гидродинамическим моделированием;
 6. Ряд решений задачи о скачке поля напряжений в слоистой линейно-упругой среде при переходе через интерфейс между слоями;
 7. Алгоритм реконструкции относительных значений главных напряжений, направлений их действия и коэффициента трения среды по данным о флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин;
 8. Результаты применения этого алгоритма для определения напряженного состояния пород, находящихся в окрестностях скважин в разных регионах.

Теоретическая значимость работы обуславливается созданием комплекса методов изучения естественных трещин, существенно расширяющего ранее разработанные подходы к использованию для этой цели геофизической информации; получением аналитических и полуаналитических решений ряда задач, находящихся на стыке механики горных пород, теории пластичности и геофизики (отдельно следует выделить активное использование аппарата математической статистики и внесение статистических оценок различных параметров в результат); публикацией решения ряда задач теории упругости слоистых сред сложной симметрии; разработкой принципиально нового подхода к использованию геофизической информации о флюидопроводимости естественных трещин для оценки природных напряжений и отдельных реологических свойств горных пород.

Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного использования разработанных методов и алгоритмов для повышения эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами с развитой естественной трещиноватостью. Отдельные решения уже внедрены в практику и активно используются на реальных месторождениях. Также следует отметить использование результатов решения обратной задачи при анализе напряженного состояния сейсмоопасного региона с прямыми перспективами исследования в области сейсмологии.

Диссертационная работа Дубини Никиты Владиславовича основана на использовании строгих законов механики, лабораторных исследованиях, результатах интерпретации геофизических исследований скважин. Предложенные автором подходы и алгоритмы реализованы в виде авторских программных модулей, в рамках которых происходит контроль качества исходных данных для моделирования. Все материалы, привлеченные автором из открытых источников, сопровождаются корректными ссылками.

По теме диссертации автором опубликовано 39 статей, из них 21 входят в перечень

рецензируемых научных журналов из списка ВАК и прошли строгую экспертизу в отечественных и международных журналах с высоким индексом цитирования.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Целесообразно продолжить работу в данном направлении с целью повышения точности и достоверности результатов решения и прямых, и обратных задач анализа естественной трещиноватости с позиций геомеханики месторождений углеводородов. Представляются перспективными направления дальнейшего углубления анализа результатов обратной задачи, развитие использования методов математической статистики, изучение более сложных реологических законов, анализ чувствительности решения обратной задачи не к зашумлению исходных данных, а к их особенностям. В то же время представляется целесообразным создание программных решений индустриального качества на базе разработанных подходов.

Замечания

К работе имеются следующие замечания:

1. При определении естественных полей напряжений напр. 5.2.2 или 5.2.3 нигде не учитываются релаксационные процессы, стремящиеся снизить девиаторную составляющую тензора напряжений, что приводит к завышению оценки разности между главными напряжениями и сказывается на результатах расчетов. Кроме того, учет возможности релаксации напряжений ставит под сомнение правомерность расчета напряжений исходя из предположения постоянства деформаций (5.2.2). Релаксационные процессы ведут к нарушению зависимостей 5.2.6 5.2.7.
2. Формула 3.2.2 не является информативной – границы слишком широки, что неудивительно. Она очевидно плоха для глубин до 500 м, что, однако, некритично.
3. Стр 27 «Широко известно, что система уравнений (2.2.1) является незамкнутой. Для ее замыкания необходимо введение в рассмотрение условий совместности деформаций и определяющих соотношений, задающих связь между напряжениями и деформациями» – неверно – в упругости если напряжения выражены через смещения, условия совместности выполняются автоматически; в неупругой области напряжения зависят не только от производных смещения, но и пластических деформаций. Аналогично Стр 32 «Поле напряжений определяется выражениями (2.2.1), условиями совместности деформаций и определяющими соотношениями (2.2.5) и (2.2.6)». – Опять неясно – что за условия совместности деформаций. Если это классические условия совместности Сен-Венана, то они для полных смещений удовлетворяются автоматически.
4. В тексте присутствуют неточности и стилистические погрешности:
 1. Стр 65 E – модуль Юнга для ветви разгрузки, считающийся равным модулю, полученному во время нагрузки. – неясно.
 2. Стр 66 Функция напряжения – неподходящий термин: под функцией напряжений понимают функцию, подстановка выражений для напряжений через которую обращает уравнения равновесия в тождества. Здесь явно речь о другом.
 3. Стр 119 «если известен коэффициент внутреннего трения породы» – скорее речь идет о коэффициенте трения по трещине (зоны ослабления), который отличается обычно в меньшую сторону от коэффициента внутреннего трения.
 4. Стр 137 рассматривая зоны трещин лучше говорить об относительном расстоянии до скважины, чем употреблять термин «радиус», вносящий путаницу.

Высказанные замечания не снижают достоинств диссертационного исследования Н.В. Дубини.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Дубини Никиты Владиславовича является законченным научно-исследовательским трудом на актуальную тему, обладает научной новизной и выполнена соискателем самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. В диссертационной работе решена научная проблема, имеющая важное значение для развития теоретических представлений о неупругом деформировании горных пород, характеризующихся развитой естественной трещиноватостью, а также для изучения напряженно-деформированного состояния этих пород. Основные результаты диссертации являются новыми и имеют практическую значимость для повышения эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов. Основные положения диссертационного исследования достаточно полно раскрыты в автореферате и публикациях соискателя.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а её автор Н.В. Дубиня достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории геомеханики,
Доктор физико-математических наук



Устинов Константин Борисович

Главный научный сотрудник,
Заместитель директора по научной работе,
Доктор технических наук



Карев Владимир Иосифович

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на семинаре ИПМех РАН 2 сентября 2026 г. Отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (сокращенное название ИПМех РАН), адрес: 119526 Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.

Подписи сотрудников ИПМех РАН К.Б. Устинова и В.И. Карева заверяю:

Зав. Канцелярией ИПМех РАН



Сафронова И.А.