

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Дубини Никиты Владиславовича

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

Диссертационная работа Дубини Н.В. нацелена на повышение эффективности и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами-коллекторами с выраженной естественной трещиноватостью.

Выбор такой темы исследования обосновывает его **актуальность**: в данный момент все чаще приходится иметь дело с месторождениями, характеризующимися крайне низкими фильтрационно-емкостными свойствами матрицы. Их разработка требует детального понимания закономерностей в положениях и проводимости трещин, которые могут быть косвенно определены на основании данных разномасштабных геофизических исследований. Полное решение задачи прогноза свойств трещиноватости по результатам сейсморазведочных работ, геофизических исследований скважин и лабораторных исследований керна требует комплексирования различных отраслей знания. Диссертационная работа Н.В. Дубини относится к геомеханическому аспекту этого вопроса: соискатель использует теоретические положения механики сплошных сред и теории разрушения для того, чтобы связать напряженно-деформированное состояние массива со свойствами находящихся в породах трещин. Автором поставлены амбициозные задачи определения пространственных ориентаций и флюидопроводимости трещин по данным о напряженном состоянии геологической среды и истории его изменения, а также сформулированы обратные задачи оценки пластовых напряжений по геофизическим данным о трещиноватости.

Представленные в диссертационной работе результаты обладают существенной **научной новизной**. Автор выбирает в качестве объекта исследования естественные сдвиговые трещины, изученные гораздо менее детально по сравнению с трещинами отрыва. На основании подходов теоретического описания необратимого деформирования предложен принципиально новый подход к прогнозу геометрических свойств естественных сдвиговых трещин. Особый интерес вызывает энергетический аспект перехода от накопленных пластических деформаций к относительному количеству трещин. Соискатель предлагает определение индекса хрупкости породы для трещиноватых пород, что позволяет существенно повысить качество получаемых корреляционных зависимостей, напрямую используемых при планировании освоения и разработки месторождений. Далее автор успешно использует эмпирически определенный

критерий флюидопроводимости трещин, основанный на соотношении нормальных и касательных напряжений, для поиска всех возможных пространственных ориентаций флюидопроводящих трещин в заданном поле напряжений. Также сформулированы новые обратные задачи оценки напряжений по данным о трещиноватости, предложены пути к их анализу, исследовано существование, единственность и устойчивость их решений. Оценки напряжений, представленные в седьмой главе, обладают самостоятельной новизной для конкретных месторождений углеводородов.

Практическая значимость полученных результатов обусловлена созданием новых подходов и алгоритмов, которые могут быть непосредственно внедрены в алгоритмы работ с трещиноватыми коллекторами. Сформулированные в главах 2 – 4 алгоритмы напрямую интегрируются в практику трех- и четырехмерного сопряженного геомеханического моделирования. Алгоритм, предложенный в главах 6 и 7 также дополняет стандартный подход к одномерному геомеханическому моделированию, что позволяет повысить точность определения пластовых напряжений для дальнейшего планирования бурения, решения задач геонавигации, дизайна гидроразрыва пласта и других практических задач геомеханики месторождений углеводородов. Отдельно следует подчеркнуть практическую значимость подхода к определению индекса хрупкости – важного параметра, необходимого для планирования мероприятий по интенсификации добычи нефти и газа.

Теоретическая значимость результатов в большей степени сопряжена с главами аналитического характера. Автор развивает подходы к моделированию неупругого деформирования горных пород в терминах неассоциированного пластического течения, предлагает алгоритм оценки параметров трещиноватости в терминах математической статистики, развивает методы оценки напряжений по косвенным данным о трещиноватости. Эти результаты, хоть и являются законченными, открывают достаточно широкие возможности для дальнейших теоретических исследований.

Выводы диссертации основаны на полученных результатах и представляются достаточно обоснованными. Выносимые на защиту научные положения обоснованы использованием строгих математических подходов, анализом качества и объема исходных данных, проведением дополнительных работ для верификации результатов моделирования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических алгоритмов для рассмотрения поставленных задач, детальным анализом полученных решений, сравнением авторских результатов с независимыми работами, а также использованием полученных результатов на реальных объектах.

По теме диссертации опубликованы 39 статей, из которых 21 входит в перечень рецензируемых научных журналов из списка ВАК. В большинстве статей автор является первым

автором, в существенной части статей – единственным. Результаты исследований неоднократно докладывались и на научных конференциях, и на конференциях прикладного характера, что также подтверждает достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из 339 страниц, включает в себя: введение, семь основных глав (которые автор относит к двум частям), заключение, список литературы из 333 наименований и приложение, содержащее работы, опубликованные самим соискателем.

Во введении автор определяет основное направление своего исследования и формулирует его цель – повышение эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами-коллекторами с развитой естественной трещиноватостью. Автор формулирует шесть задач, четыре из которых сопряжены с созданием математического аппарата для прогноза свойств естественных трещин и напряженного состояния массива, одна нацелена на исследование решений и одна связана с верификацией результатов. Во введении автор также дает краткий обзор современного состояния исследований по теме работы, обосновывает научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных им результатов, описывает используемые им методы исследования, формулирует выносимые на защиту положения и дает обзор своих собственных работ по теме диссертации.

В первой главе сформулирована основная тема первой части работы – определение свойств естественных трещин по результатам геомеханического моделирования. Соискатель дает краткий обзор того, какими методами на данный момент решаются вопросы подобного характера в практике разработки месторождений углеводородов и строго определяет объект исследования. Под естественной трещиной автор понимает поверхность разрыва вектора смещения, под трещиноватостью – совокупность таких трещин в элементарном объеме среды, который может быть описан единым тензором напряжений. Автор дает важные замечания о размере представительного объема и ограничивается в своих исследованиях только трещинами сдвига.

Во второй главе представлена математическая модель, позволяющая использовать информацию об изменении напряженно-деформированного состояния геологической среды для определения положений и пространственных ориентаций трещин в ней. Модель основана на использовании неассоциированного пластического течения для описания неупругого деформирования с упрочнением по углу внутреннего трения. Автор рассматривает типичные псевдотрехосные испытания по сжатию цилиндрических образцов горной породы и предлагает математический аппарат, определяющий относительное количество разноориентированных

трещин. Важным звеном, связующим накопленные деформации с относительным количеством трещин, оказывается понятие индекса хрупкости. Н.В. Дубиня посвящает отдельный параграф вопросу корректного определения индекса хрупкости по лабораторным исследованиям и демонстрирует высококачественные корреляционные зависимости между хрупкостью и различными свойствами. На основании комплекса теоретических исследований, экспериментальных работ, численного моделирования и фактических приложений автор обосновывает первое защищаемое положение, связанное с возможностью прогноза положений и пространственных ориентаций естественных трещин.

Третья глава посвящена прогнозу флюидопроводимости естественных трещин сдвига в заданном поле напряжений. На основании эмпирического критерия флюидопроводимости, основанного на критерии сухого трения, автор предлагает аналитическое выражение, позволяющее определить все возможные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин. Представлены несколько вариантов расчета этих ориентаций для ряда модельных задач. Отдельное внимание Н.В. Дубиня уделяет вопросу статистического анализа: глава завершается введением такого параметра как вероятность случайно выбранной трещины быть флюидопроводящей. Автор дает полуаналитический алгоритм расчета этой вероятности. Ряд модельных задач и сравнение с фактическими данными позволяют соискателю обосновать второе и третье защищаемые положения, связанные с определением флюидопроводимости естественных трещин сдвига.

В четвертой главе автор объединяет модели из предыдущих двух глав и предлагает их объединение в общий алгоритм. В качестве примера представлен прогноз параметров естественной трещиноватости на одном из месторождений углеводородов. Показано, что спрогнозированное Н.В. Дубиней относительное количество флюидопроводящих трещин коррелирует с показателями добычи. Полевые данные косвенным образом подтверждают все сформулированные выше защищаемые положения.

Пятая глава открывает вторую часть диссертационного исследования, сфокусированную на обратной задаче – определении параметров текущего напряженного состояния по данным о трещиноватости. В этой главе сформулирована одномерная задача геомеханики месторождений углеводородов – задача реконструкции профилей напряжений вдоль траектории скважины. Что интересно, автор не только дает обзор существующих подходов к ее решению, но и предлагает свой собственный, основанный на рассмотрении равновесия слоистой линейно-упругой среды. Н.В. Дубиня позиционирует его как компромисс между часто используемыми моделями линейного роста напряжений с глубиной и пороупругими моделями. Рассмотрение ряда модельных задач позволяет автору обосновать четвертое защищаемое положение, связанное с полем напряжений в слоистой среде.

В шестой главе Н.В. Дубиня формулирует обратную задачу – реконструкцию профилей напряжений по данным о трещиноватости. Как и в третьей главе, в основе подхода лежит концепция, связывающая флюидопроводимость отдельно взятой трещины сдвигом с соотношением между напряжениями, действующими на ее поверхности. При этом сведения о флюидопроводимости используются, как исходные данные: наблюдаемые локальные аномалии геофизических полей в окрестностях трещин связываются с течением флюида. Автор ставит задачу поиска таких параметров, определяющих напряженное состояние, при которых наблюдается максимальное соответствие между флюидопроводящими и критически напряженными трещинами. Н.В. Дубиня решает поставленную задачу методом Монте-Карло для ряда синтетических моделей естественных трещин. На этих моделях он показывает существование решения задачи, отсутствие систематических ошибок и устойчивость решения по отношению к зашумлению исходных данных. Отдельно рассмотрена область эквивалентности решений обратной задачи. Решение модельных задач позволяет говорить об обосновании заключительного защищаемого положения, связанного с оценкой напряжений по сведениям о трещиноватости.

В седьмой главе Н.В. Дубиня применяет разработанный алгоритм для оценки пластовых напряжений для трех примеров: для исследовательской скважины в Японии, для скважин на геотермальном поле в Новой Зеландии и для скважины, разрабатывающей одно из месторождений республики Татарстан. Во всех трех случаях представлен обзор объекта, анализ исходных данных, результаты оценки напряжений. Автор уделяет внимание анализу результатов: обосновывает их корректность путем сравнения с независимыми исследованиями, проводит факторный анализ, дает геофизическую интерпретацию. Отдельно поднимает вопрос корректного выбора порогового значения целевой функции для статистического анализа результатов решения обратной задачи. Полученные результаты согласуются с другими опубликованными исследованиями, что подтверждает сформулированное заключительное защищаемое положение.

В заключении Н.В. Дубиня кратко пересказывает содержание основных частей диссертации и обсуждает направления дальнейших исследований.

Диссертационная работа производит положительное впечатление, результаты обоснованы и обладают существенной научной и практической значимостью, можно говорить об их научной новизне. Диссертационная работа является комплексным законченным научным исследованием, нацеленным на решение значимой задачи повышения эффективности и геологической безопасности освоения и разработки месторождений нефти и газа.

Замечания

К диссертационной работе можно сделать несколько замечаний, не снижающих высокий уровень научного исследования:

1. Н.В. Дубиня предлагает определять индекс хрупкости на основании анализа кривой напряжение-деформация, полученной по результатам лабораторных исследований на керне. Каким образом этот индекс хрупкости можно связать с аналогичными индексами, полученными по результатам геофизических исследований скважин и сейсмических работ? Автор не раскрывает вопрос перемасштабирования индекса хрупкости в тексте диссертации.
2. То же замечание можно отнести и к другим результатам второй главы. Автор избегает вопроса возможности перемасштабирования параметров упрочнения и напрямую подтверждает результаты моделирования только в масштабе керновых исследований. Насколько обоснован переход на масштаб геофизических исследований скважин и трехмерного геомеханического моделирования?
3. Н.В. Дубиня предлагает подход к оценке положений и пространственных ориентаций трещин наряду с их флюидопроводимостью по результатам геомеханического моделирования. Для оптимизации разработки месторождений эта информация полезна, но не так полезна, как входные данные для генерации дискретных моделей трещин (DFN). Хотелось бы увидеть прямой переход от авторских разработок к практическому инструменту.
4. В пятой главе автор использует в качестве предположения непрерывность вектора смещений при переходе через границу между слоями. При этом на практике именно у границы можно встретить наличие поверхностей скольжения и трещин. Насколько они нарушают это предположение?

Указанные замечания не умаляют достоинства полученных результатов и общего уровня проведенных исследований и научной квалификации Н.В. Дубини.

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

Диссертация Н.В. Дубини является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным соискателем самостоятельно на высоком научном уровне. В заключении каждой главы сделаны четкие выводы, сформулированы обоснованные рекомендации.

В диссертационной работе решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение для страны и связанная с развитием нефтегазового комплекса Российской Федерации. Полученные в диссертации научные результаты являются основой для повышения экономической эффективности разработки месторождений нефти и газа, характеризующихся

выраженной естественной трещиноватостью пород-коллекторов, а также для снижения экологических рисков их освоения.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация «Прямые и обратные задачи изучения естественной трещиноватости методами геомеханики» соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени доктора наук, а её автор, Дубиня Никита Владиславович, достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Я, Байков Виталий Анварович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Искусственного интеллекта и
перспективных математических исследований»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

Уфимского университета науки и технологий

Байков Виталий Анварович

450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К.Маркса, д. 12, корпус 1, ком. 418

Тел. 7-908-350-22-76

kafmat@uust.ru

01.10.2026

