

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

Диссертация Н.В. Дубини посвящена актуальной проблеме изучения горных пород с развитой естественной трещиноватостью. Соискатель говорит о том, что работа состоит из двух частей, соответствующих прямым и обратным задачам геомеханического описания трещиноватых пород. Решение рассматриваемого комплекса задач можно признать актуальным и значимым научным достижением.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена текущим состоянием теоретических исследований трещиноватых горных пород. Полученные автором результаты используются для общего развития понимания механического описания микронеоднородных сред и их неупругого деформирования, для создания подходов к прогнозу свойств естественных трещин по комплексу разномасштабных геофизических исследований, что является актуальным вопросом освоения и разработки месторождений полезных ископаемых, для создания подхода к оценке природных напряжений в геологическом массиве по косвенным источникам информации. Предложенные соискателем методы и подходы, постановка и решение части теоретических задач представляются актуальными на текущем этапе развития геофизических исследований.

Научная новизна полученных в диссертационном исследовании результатов обусловлена тем, что часть задач поставлена впервые, использованы авторские методы решения этих задач, полученные теоретические решения в ряде случаев являются обобщением и развитием уже существующих подходов (описание неупругого деформирования в терминах развития естественной трещиноватости – глава 2; определение вероятности флюидопроводимости случайно выбранной трещины в заданном поле напряжений – глава 3; поле напряжений в слоистой трансверсально изотропной среде – глава 5); в работе созданы принципиально новые подходы к изучению отдельных вопросов (создание динамической модели трещиноватости – глава 4; оценка природных напряжений по сведениям о флюидопроводимости естественных трещин в окрестности скважины – глава 6); предложенные подходы применены для конкретных теоретических (тренды во флюидопроводимости естественных трещин при различных условиях – глава 3) и практических задач (прогноз флюидопроводимости естественных трещин на конкретных геологических объектах – главы 3 и 4; оценка напряжений в различных регионах – глава 7).

Полученные результаты обладают **теоретической и практической значимостью**. С практической точки зрения предложенные автором методы и подходы могут напрямую использоваться для повышения эффективности и безопасности бурения скважин, а также оптимизации разработки месторождений углеводородов благодаря выбору режимов работы скважин и проведению мероприятий, направленных на интенсификацию добычи. Кроме того, подход к оценке напряжений по скважинным данным о поведении естественных трещин позволяет устанавливать граничные условия для дальнейшего моделирования полей напряжений в отдельных регионах, в частности, в сейсмоопасных зонах. Теоретическая значимость

результатов, полученных соискателем, связана в первую очередь с развитием моделей неупругого деформирования микронеоднородных сред, а также с развитием статистических методов описания таких сред.

Научные положения, сформулированные в диссертационной работе **обоснованы** полученными результатами выполненных лабораторных исследований и численного моделирования, а также сравнением результатов применения разработанных подходов с независимыми исследованиями, опубликованными в литературе. Сформулированные выводы и рекомендации обоснованы представленными в тексте диссертационной работы моделями. Также текст диссертации и опубликованные соискателем работы подтверждают **достоверность** сформулированных научных положений, выводов и рекомендаций

Всего по теме диссертации соискателем опубликованы 39 статей, из которых 21 входит в перечень рецензируемых научных журналов из списка ВАК. Отдельные статьи теоретического характера опубликованы без соавторов, в существенной части работ соискатель является первым автором. Результаты исследований многократно докладывались Н.В. Дубиней на различных научных конференциях, включая международные мероприятия высшего уровня.

Содержание работы

Подготовленное автором диссертационное исследование состоит из введения, семи основных глав, разделенных на две части, заключения, списка использованных источников и приложения, содержащего перечень публикаций, подготовленных автором по теме диссертации.

Во **введении** автор описывает тему исследования, обосновывает ее актуальность, кратко анализирует современное состояние научных работ по теме диссертации, описывает методы исследования и формулирует основные положения, выносимые на защиту. В качестве основной цели исследования автор указывает повышение эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами-коллекторами, обладающими ярко выраженной естественной трещиноватостью. Из поставленных далее задач становится ясно, что исследование носит в целом теоретический характер: большинство задач связано с разработкой алгоритмов и методов, не упоминается моделирование.

К **первой части** диссертации автор относит первые четыре главы. Первая часть заявлена автором, как изучением прямых задач описания естественной трещиноватости на основании результатов геомеханических исследований.

В **первой главе** автор описывает современные подходы к построению моделей трещиноватости в геологических средах. Н.В. Дубиня выделяет два крупных класса моделей естественных трещин: дискретные модели, в которых каждая трещина рассматривается по отдельности, и модели эффективных свойств, при построении которых определяются статистические законы распределения трещин в элементарном объеме среды. Автор относит свои подходы ко второй группе моделей. В заключительной части главы обосновано изучение естественных трещин сдвига, как основного объекта исследования, дано определение того, чем является элементарный объем, рассматриваемый впоследствии, анонсировано дальнейшее использование полей напряжений и деформаций для анализа геометрических свойств естественных трещин.

Вторая глава диссертации посвящена анализу естественных сдвиговых трещин в образцах горных пород, помещенных в обстановку псевдотрехосного сжатия. Н.В. Дубиня работает в парадигме, развитой ранее в работах В.Н. Николаевского: описывает неупругое деформирование горных пород с использованием неассоциированного закона пластического течения. Описан алгоритм использования фактических экспериментальных данных для определения параметров упрочнения (автор работает в предположении об пластическом

упрочнении с ростом коэффициента трения). Далее он связывает изменение коэффициента трения с изменением пространственных ориентаций трещин в образующихся и развивающихся образцах горных пород. Соискатель предлагает алгоритм интерпретации лабораторных данных для определения статистических оценок пространственных ориентаций и положений трещин в образце. Сформулированная модель применена для описания фактических экспериментальных данных, выполнена верификация результатов ее применения на основании косвенных замеров изменения внутренней структуры образца, а также с использованием результатов численного моделирования. Отдельное место занимает энергетический анализ развития необратимых деформаций в образце, а также исследование хрупкости горных пород.

В **третьей главе** исследования автор переходит от положений и пространственных ориентаций трещин в образце горной породы к флюидопроводимости систем трещин в представительном объеме геологической среды. Глава начинается с введения понятия критически напряженных трещин – концепции, согласно которой соотношение между сдвиговым и касательным напряжениями на поверхности трещины сдвига определяет ее флюидопроводимость в текущем поле напряжений. Н.В. Дубиня демонстрирует каким образом эта концепция позволяет определить все возможные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин в заданном поле напряжений, вводит параметры доли критически напряженных трещин и вероятность случайно выбранной трещины быть критически напряженной. На ряде аналитических примеров он показывает возможности практического применения полученного результата

Четвертая глава содержит в себе объединение результатов двух предыдущих глав. Н.В. Дубиня предлагает алгоритм, применение которого позволяет использовать результаты моделирования напряженно-деформированного состояния геологической среды для определения того, на каких этапах деформирования происходит зарождение и развитие сдвиговых трещин, а также какие из них являются флюидопроводящими в текущем поле напряжений. Автор утверждает, что предлагает алгоритм построения динамической модели трещиноватости, способной предсказывать изменения параметров трещин в породах-коллекторах углеводородов при разработке месторождений. В заключительной части главы соискатель демонстрирует верификацию разработанных подходов и алгоритмов с привлечением реальных данных.

Вторая часть диссертации посвящена обратной задаче геомеханического описания естественной трещиноватости. Под этой задачей автор понимает использование информации о пространственных ориентациях и флюидопроводимости естественных трещин для определения отдельных параметров напряженного состояния среды. Рассматривается одномерная задача реконструкции профилей напряжений вдоль траекторий скважин.

Эта задача подробно рассмотрена в **пятой главе** диссертационного исследования. В ней сформулирована решаемая задача и описаны два основных подхода к построению профилей напряжений в одномерных задачах геомеханики месторождений углеводородов. Н.В. Дубиня описывает их как пороупругую и линейную модели. В этой же главе он рассматривает частную задачу определения напряженного состояния слоистой линейно упругой среды, слои которой сцеплены друг с другом. Автор воспроизводит существующее решение этой задачи в изотропном случае, а затем получает обобщения на частные случаи анизотропии. По результатам решения этих задач он предлагает алгоритм построения кусочно-линейной зависимости напряжений от глубины. В заключительной части главы отмечается потребность в независимой оценке отдельных компонент тензора напряжений, необходимой для доопределения тектонических напряжений. Соискатель дает краткий обзор существующих методов таких оценок и отмечает актуальность развития альтернативных подходов.

Одному из таких подходов посвящена **шестая глава** диссертационного исследования. В ней описанная выше концепция критически напряженных трещин используется для определения относительных значений главных напряжений, направлений их действия и коэффициента трения среды. Автор формулирует задачу поиска такой комбинации этих параметров, при которых наблюдается оптимальное соответствие критически напряженных трещин флюидопроводящим. Н.В. Дубиня рассматривает две постановки задачи (постановка субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений и общий случай произвольного напряженного состояния), анализирует возможность решения обратной задачи, его существование, единственность и устойчивость по отношению к зашумлению исходных данных на синтетических моделях трещиноватости. Сама постановка задачи и алгоритм ее решения выносятся автором в качестве основного результата двух заключительных глав диссертации.

В **седьмой главе** Н.В. Дубиня демонстрирует примеры применения разработанного подхода для оценки напряжений на трех объектах: исследовательских скважинах региона желоба Нанкай, Япония; скважинах, разрабатывающих геотермальное поле Ротокава, Новая Зеландия; скважинах, разрабатывающих одно нефтегазовое месторождение республики Татарстан. Автор показывает результаты реконструкции напряжений, проводит анализ этих результатов (в том числе, выполняет факторный анализ), обсуждает соответствие проученных реконструкций и независимых оценок напряжений, опубликованных в литературе. Глава содержит, как обоснование достоверности результатов второй части диссертации, так и обладающие собственной значимостью оценки напряжений в конкретных регионах.

В **заключении** Н.В. Дубиня повторяет основные полученные результаты и формулирует потенциальные направления дальнейших исследований.

Текст диссертационной работы достаточно объемный, содержит подробные математические выкладки и обсуждение результатов. Результаты работы могут быть воспроизведены независимо, при наличии аналогичных исходных данных, или представленных в диссертации, или процитированных, причем ссылки на эти данные присутствуют в тексте.

Автореферат и научные публикации соискателя в полной мере отражают содержание диссертационного исследования.

Замечания по содержанию диссертации

Сделанные ниже замечания носят характер пожеланий и предложений к обсуждению на защите; они не ставят под сомнение основные результаты диссертационной работы.

1. В параграфе 2.2 в качестве условия пластичности в выражении (2.2.4) выписан критерий Друкера–Прагера в инвариантной форме ($T \leq \alpha \tau \cdot I + c$, $T = \sqrt{(s_{ij} \cdot s_{ij})}$), при этом параметр $\alpha \tau$ определен равенством $\alpha \tau = \sin \varphi \tau$. В то же время в выражении (2.2.10), выведенном для случая псевдотрёхосного сжатия, используется классическое мор-кулоновское соотношение $N_\alpha = (1 + \alpha \tau) / (1 - \alpha \tau) = \sigma_1 / \sigma_3$. Прямой переход от (2.2.4) к (2.2.10) при $\sigma_2 = \sigma_3$ даёт коэффициент σ_1 / σ_3 , отличающийся от N_α в форме Мора–Кулона (при $\varphi \tau = 30^\circ$ это 5,75 против 3,0). Таким образом, в работе совмещаются обе формы критерия прочности без явного указания, какая аппроксимация конуса Друкера–Прагера к призме Мора–Кулона (вписанная, описанная или согласованная по трёхосному сжатию) используется при отождествлении $\alpha \tau = \sin \varphi \tau$. Желательно явно зафиксировать эту аппроксимацию и указать её влияние на численные оценки в задачах главы 4.

2. Выражение (2.2.12) для угла $\psi = \pi/4 - \varphi \tau/2$ между осью образца и нормалью к плоскости трещины сдвига выведено, как корректно отмечает автор, для среды, подчиняющейся линейному критерию Кулона–Мора. В дальнейшем (параграфы 2.2.6, 2.3, глава 4) это выражение используется в рамках декларированной неассоциированной упругопластической модели с дилатансией. Между тем, как показали Vermeer и de Borst (1984), цитируемые автором, в

неассоциированной модели угол полосы локализации отличается от мор-кулоновского и описывается формулой Артура/Вардулакиса $\psi = \pi/4 - (\varphi_{fr} + \psi_{dl})/4$. Систематическое расхождение составляет порядка 5–10° при характерных значениях угла дилатансии. Целесообразно в окончательной редакции работы пояснить, почему этим эффектом можно пренебречь, либо оценить вызванную им погрешность в прогнозе ориентаций $N_{fr}(\psi)$.

3. В параграфе 7.5 в обсуждении результатов реконструкции напряжённого состояния присутствует фраза «этими рассуждениями подтверждается ранее сформулированное защищаемое положение №7...», тогда как в работе сформулированы только пять защищаемых положений (№1–№5). Данное упоминание требует исправления.

4. В тексте диссертации фамилия Drucker передаётся в различных вариантах написания – «Друкер», «Друккер» и «Друккера» (например, при ссылках на критерий Друкера-Прагера в параграфах 2.2 и 3.3). Желательна унификация написания.

5. В главе 4 при ссылках на «Рисунок 4.3.3» приводится изображение, фактически имеющее подпись «Рисунок 4.3.4»; при этом самостоятельного рисунка с номером 4.3.3 в тексте не обнаружено. Нумерацию рисунков в параграфе 4.3 следует привести в соответствие со ссылками.

6. В главе 3 сохранился заголовок «2.1 Возможные пространственные ориентации...» (в районе начала параграфа 3.1), который, исходя из содержания, должен относиться к параграфу 3.1 либо быть удалён.

7. В тексте встречаются единичные опечатки («использовуется» вместо «используется», «горизонтали» вместо «горизонталь» и др.), требующие корректорской правки.

8. В обсуждении результатов параграфа 7.4 целесообразно явно указать диапазон применимости распределения *metalog* (Keelin, 2016): автор корректно отмечает, что ограничивается первыми 10 членами разложения ввиду неустойчивости, но количественные оценки погрешности усечения не приведены.

9. Численные значения коэффициента детерминации R^2 при сопоставлении расчётной и наблюдаемой хрупкости (0,78 – для коротких образцов, 0,55 – для длинных, 0,59 – для всей выборки), а также $R^2 \approx 0,42$ в одном из полевых примеров главы 7, представлены честно, однако обсуждение возможных причин снижения значения R^2 для длинных образцов и для отдельных полевых объектов могло бы быть более развёрнутым.

10. Формулировки ряда пунктов научной новизны (в первую очередь – пунктов 1, 2 и 4 защищаемых положений) в автореферате и во введении в работе изложены в обобщённой форме, без явного разграничения собственного методического вклада автора и развиваемых подходов предшественников (В.Н. Николаевский, И.А. Гапараш, Р.А. Vermeer и R. de Borst – для пункта 1; J.E. Streit, R.W. Hillis, A. Morris, R.J. Lisle, M.D. Zoback – для аналитики slip tendency, родственной пункту 2; В. Amadei, M.D.G. Salamon – для слоистой упругой среды в пункте 4). Целесообразно при защите более явно акцентировать, в чём состоит самостоятельное методическое и прикладное приращение результатов диссертации по отношению к ранее опубликованным работам этих авторов.

Сделанные замечания носят характер пожеланий и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Дубини Н.В. посвящена изучению образования трещин при неупругом деформировании горных пород, их флюидопроводимости и оценкам напряженного состояния массива по косвенным признакам. Диссертационная работа является завершённым научно-квалификационным исследованием и содержит решение ряда актуальных задач,

обладающих существенной теоретической и практической значимостью.

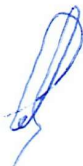
Диссертация, представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное и экономическое значение для страны, связанная с развитием топливно-энергетического комплекса Российской Федерации.

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, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9. «Геофизика».

Я, Левин Владимир Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ,
профессор кафедры
вычислительной механики
механико-математического факультета
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова



Левин Владимир Анатольевич

Адрес: 119992 Москва, ГСП-2, Ленинские Горы, МГУ, механико-математический факультет,
кафедра вычислительной механики
Тел. +7(495)9391834
Mail: v.a.levin@mail.ru

6 октября 2026 г.

Подпись Левина В.А. заверяю:

«6» октября 2026 г.

