

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Гасеми Мохаммадфариды

на тему: «**Влияние микроструктуры карбонатных пород на их физико-механические свойства**»

по специальности **25.00.10** - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Актуальность темы исследований.** При разработке месторождений углеводородов все большую актуальность приобретает необходимость использования трудоемких и дорогостоящих методов сопровождения бурения скважины, ее обустройства, поддержания дебита и т.д. Обеспечение необходимой эффективности всех рабочих процессов, снижение аварийности, повышение извлекаемости углеводородов требуют построения и использования все более сложных моделей, адекватно описывающих все процессы, происходящие в недрах при освоении месторождений. Если необходимость построения геологических и гидродинамических моделей признана достаточно давно, то интерес к геомеханическим моделям усилился сравнительно недавно, при переходе к месторождениям с трудноизвлекаемыми запасами. Построение геомеханических моделей требует достаточно большого набора данных, причем даже количество независимых параметров, необходимых для геомеханического описания, является дискуссионным и может быть разным для разных типов пород. Сложность построения геомеханических моделей усугубляется тем, что скважинные измерения не позволяют получить информацию, в полной мере отражающую геомеханические свойства. При этом опыт показывает, что лабораторные испытания кернов также не снимают всех вопросов. К таким вопросам относится вечная проблема переноса данных лабораторных измерений, в том числе измерений на микромасштабном уровне, на масштабы месторождений. Только наращивание экспериментальных данных в сочетании с их тщательной обработкой и использованием наиболее современных моделей позволит решить проблемы, часть из которых перечислена выше. Поэтому тема и содержание рассматриваемой диссертации является актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Защищаемые положения, выводы и рекомендации обоснованы путем выполнения очень тщательного анализа существующих работ по рассматриваемой теме (обзор исследований занимает более четверти объема всей диссертации и на протяжении всего текста автор обращается к работам предшественников), проведения теоретических и экспериментальных исследований и сопоставления полученных результатов. Выполнен обзор современных методов определения эффективных физических характеристик порово-трещиноватых сред на основе их микроструктуры. Экспериментальные исследования образцов кернов проводились в рамках единого комплекса петрофизических работ, разработанного в ИФЗ РАН. Были отобраны 5 полноразмерных кернов карбонатных пород различного генезиса, и один полноразмерный керн песчаника,

динамических модулей упругости пород аналогичного типа при изменении петрофизических параметров моделей, включая тип порозаполняющего флюида.

**Содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, объем диссертации 228 страниц, она включает 48 рисунков, 26 таблиц и одно приложение. Список цитируемых научных публикаций содержит 213 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы, решаемые задачи, приводятся основные оригинальные результаты, защищаемые положения, отражены новизна и практическая значимость исследования, даются сведения о вкладе автора в работу, об апробации и об основных публикациях автора по теме диссертации.

**Первая глава** является обзорно-постановочной. Подробно рассматриваются результаты мировых исследований по определению статических и динамических модулей упругости пористых пород, изучению параметров, оказывающих влияние на соотношение величин модулей. Представлено описание наиболее распространенных методов моделирования эффективных упругих свойств горных пород на основе их петрофизических параметров. Рассмотрены основные положения теории эффективных сред, и разработанные на ее основе методы, которые предлагается разделить на три группы: 1) методы, основанные на вариационных принципах; 2) методы микромеханики композитов, основанные на локальной линейной теории упругости; 3) методы, основанные на волновом уравнении. Подробно рассмотрен метод обобщенного сингулярного приближения (ОСП), который в дальнейшем применяется в рассматриваемой работе.

Во **второй главе** описываются результаты анализа экспериментальных данных и математического моделирования эффективных упругих свойств образцов карбонатных пород. Результаты, полученные с помощью ультразвуковой томографии керна, компьютерной томографии, оптического и растрового электронного микроскопов, позволили оценить степень неоднородности образцов и определить наличие или отсутствие анизотропии упругих свойств. На основе анализа микроструктуры породы в разных масштабах были построены параметрические математические модели для исследуемых образцов. Эти модели включают общую и трещинную пористость, параметр связности пустот, аспектное отношение пор и трещин. Для оолитового известняка построена более сложная модель, отражающая особенности пустотного пространство самих оолитов. Исследована чувствительность построенных моделей к микроструктурным параметрам.

К наиболее важным результатам исследований, описанных во второй главе, относится выявление довольно широкой области возможной неопределенности в параметрах микроструктуры, экспериментальные значения для которых получить практически невозможно. Эти параметры включают: параметр связности пустотного пространства, аспектное отношение трещин и трещинную пористость.

Основное содержание **главы 3** состоит в описании результатов анализа данных трехосных одностадийных и многостадийных испытаний образцов пород. Помимо величин статических модулей Юнга, определены значения давления закрытия трещин и дилатации, передела упругости и пиковой прочности исследованных образцов. На основе анализа начальной зоны нелинейного по-

ведения при нагрузке образца определены максимальное значение аспектного отношения трещин и максимальное значение коэффициента трещинной пористости. Оценены верхние границы аспектного отношения трещин, образовавшихся в процессе деформирования образцов, а также трещинной пористости образцов при нормальных условиях

**Глава 4** представляет, с точки зрения оппонента, наибольший интерес. В ней предложен метод для оценки ограничений сверху на параметр связности пустот и (с использованием ограничений на трещинную пористость и аспектное отношение трещин) решена обратная задача по определению упругих свойств изученных кернов. Выполнена оценка величины корреляции между параметрами микроструктуры и модулями упругости (статическим и динамическим модулями Юнга). Для определения влияния микроструктурных параметров на статический и динамический модули Юнга использован факторный анализ, на основе результатов которого сделан вывод о том, что параметры, характеризующие объем и связность пор и трещин, оказывают более заметное влияние на упругие модули по сравнению с параметром формы пустот. Наиболее значимым параметром, влияющим на модули Юнга и их отношение, оказалась общая пористость породы.

#### **Замечания.**

1. Во многих корреляционных зависимостях, предложенных автором (напр., стр.138, стр.150), используются размерные величины, и от размерных величин берутся логарифмы, размерные величины используются в показателях экспонент (стр.150). Хотя такое использование, к сожалению, довольно часто встречается в научных работах, оно, обычно, свидетельствует о недостаточном внимании авторов. Любую зависимость вида  $algb + c$  можно переписать в безразмерном виде, как  $d\lg b/e$ , в которой логарифм будет братья уже от безразмерной величины. При этом нормирующий параметр может иметь свой физический смысл и давать дополнительную характеристику.
2. На стр.27 опечатка в формуле 1.10.
3. Стр.75 и далее: следовало бы привести частотный диапазон, в котором проводились ультразвуковые измерения, сопоставить длины волн с характерными размерами выделяемых неоднородностей.
4. Стр.85 «... уменьшение объемной доли трещин относительно объемной доли пор повышает модули упругости, т.е. трещиноватость среды снижает упругие модули» - не очень четкое высказывание, первое утверждение не эквивалентно второму.
5. Стр.86 не очень ясное высказывание «... упругие модули увеличиваются при увеличении аспектного отношения пор, т.е. среда со сферическими порами является более жесткой, чем среда с аналогичными петрофизическими свойствами, содержащая эллипсоидальные поры» - увеличение модуля упругости эквивалентно повышению жесткости, не понижению.
6. Не очень удачным представляется использование понятия «всестороннее испытание», видимо, имеется в виду «трехосное нагружение».

