

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)



М. Р. Филонов

2019 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Мохаммадфариды Гасеми «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 исследований. Объект и предмет исследований**

Диссертация М. Гасеми посвящена вопросам установления связей между физико-механическими свойствами карбонатных пород и их микроструктурными параметрами, включающими важнейшие для нефтегазовой отрасли характеристики пустотности – объемную концентрацию пустот различного типа, относительное раскрытие пустот и степень их связности.

Исследование этих вопросов актуально в силу все более широкого использования геомеханического моделирования разработки месторождений углеводородов, которое в настоящее время используется на всех ее этапах – начиная от бурения скважин. Для проведения геомеханического моделирования в качестве входных данных требуется информация о статических модулях упругости пород и их прочностные характеристики. Однако измерение этих характеристик невозможно при проведении работ ГИС. В связи с этим возникает задача оценки этих свойств по доступным данным ГИС, в частности, скоростям упругих волн и плотности, которые позволяют получить динамические модули упругости пород. В свою очередь, динамические модули упругости определяются составом пород и их микроструктурой, включая морфологические характеристики пустотного пространства. Такие взаимосвязи устанавливаются посредством моделирования с использованием методов теории эффективных сред. Это моделирование предполагает создание параметрических математических моделей эффективных упругих свойств пород, в число параметров которых входят также и характеристики пустотного пространства пород. В настоящее время не существует аналогичных теорий, позволяющих подобным образом оценить статические модули упругости.

В представленной к защите работе предложен способ установления таких зависимостей, позволяющих оценить влияние микроструктурных параметров на физико-

механические свойства карбонатных пород. Такие зависимости позволяют оценивать степень изменения этих свойств при вариациях одного или нескольких параметров микроструктуры (например, степени раскрытия трещин, трещинной пористости, связности пустот) в процессе бурения скважин или разработки месторождений.

Объектом исследований данной работы явились карбонатные породы различной микроструктуры.

Предметом исследования явились а) физико-механические свойства карбонатных пород, включающие динамические и статические модули упругости, а также прочностные характеристики; б) микроструктура пород; в) петроупругие модели пород; г) взаимосвязи между микроструктурными параметрами петроупругих моделей и характеристиками физико-механических свойств.

### **Цель и задачи исследований**

Цель работы – установление связей между физико-механическими свойствами пород и их микроструктурными параметрами, обеспечивающих повышение достоверности прогноза геомеханических параметров горных пород при анализе процессов, связанных с бурением скважин и разработкой месторождений полезных ископаемых.

Для достижения поставленной цели автором диссертации сформулировано пять задач, которые включают:

1. Анализ результатов трехосных испытаний образцов карбонатных пород с помощью нагружающего сервогидравлического устройства (пресса). Эти результаты использованы в дальнейшем для характеристики трещиноватости и оценки статических модулей упругости.
2. Установление границ возможного изменения параметров трещиноватости (аспектного отношения трещин, трещинной пористости) и параметра связности пустотного пространства карбонатных пород на основе анализа результатов измерений фильтрационно-емкостных свойств пород и трехосных испытаний образцов.
3. Построение петроупругих параметрических моделей карбонатных пород в масштабе зерна с использованием методов теории эффективных сред на основе результатов анализа данных ультразвуковой томографии представительных образцов зерна с учетом микроструктуры пород, изученной с помощью рентгеновской томографии, оптического и растрового (сканирующего) электронного микроскопов.
4. Построение корреляционных зависимостей, позволяющих определять статический модуль Юнга по его динамическому аналогу и коэффициенту общей пористости для изученных пород.
5. Построение бинарных и многопараметрических корреляционных зависимостей между статическим и динамическим модулем Юнга и параметрами микроструктуры моделей пород.

## **Научная новизна работы**

Выполненные автором в результате проведенного им численного исследования чувствительности построенных петроупругих моделей карбонатных пород к их параметрам позволили оценить возможную степень неопределенности решения по определению параметров моделей с использованием данных лабораторного неразрушающего эксперимента, что, несомненно подтверждает научную новизну работы. На основании этих результатов сделан вывод о некорректности обратной задачи по определению неизмеряемых параметров моделей (в частности, трещинной пористости, связности пустот), что требует регуляризации обратной задачи. Новым моментом явились разработанные автором методы сужения границ изменения трещинной пористости и параметра связности пустотного пространства.

К научной новизне данной работы несомненно следует также отнести результаты примененного автором факторного анализа, который позволил выделить два латентных фактора, определяющих влияние микроструктуры пород на их физико-механические свойства: фактор объема и связности пустот и фактор формы пустот. Причем в работе показано, что первый латентный фактор имеет доминирующее влияние на физико-механические свойства пород. На основе факторного анализа построены бинарные и многопараметрических корреляционные зависимости между микроструктурными параметрами петроупругих моделей и характеристиками физико-механических свойств пород, а также проведен анализ влияния параметров моделей на эти свойства.

Исследовано влияние на физико-механические свойства пород объема микрита, размера кристаллов и макропор – параметров, характеризующих размер неоднородностей, и по этой причине не включенных в петроупругие модели.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что полученные автором параметрические математические модели эффективных упругих свойств позволяют, во-первых, упростить построение математических моделей месторождения и, во-вторых, эти модели могут быть применены для оценки динамических модулей упругости пород аналогичного типа.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы** соискателя подтверждается верификацией всех предложенных алгоритмов и моделей экспериментальными данными.

Результаты работы опубликованы в 8 печатных работах, из которых 2 входят в перечень рецензируемых научных журналов ВАК. Помимо этого, в списке работ соискателя также две работы, входящие в базу Web of Science, имеющие отношение к теме диссертации. Среди докладов, сделанных соискателем, есть также международные.

## Оценка содержания работы

Диссертация М. Гасеми объемом 228 страниц состоит из введения, четырех глав и заключения. При написании работы было использовано 211 источников информации, диссертация содержит 48 рисунков и 26 таблиц.

В первой главе диссертации представлен широкий обзор методов, применимых к оценке статических и динамических модулей упругости, проанализированы факторы, определяющие их различие. Описаны основные методы петроупругого моделирования, дано обоснование выбора метода обобщенного сингулярного приближения (ОСП) для петроупругого моделирования исследуемых карбонатных пород.

Во второй главе проанализированы результаты экспериментов многоуровневого ультразвукового просвечивания образцов, которые позволили количественно определить степень неоднородности упругих свойств пород и классифицировать породы как изотропные с отдельными неоднородностями. Эта глава также содержит описание методики построения петроупругих моделей карбонатных пород, позволяющих связать эффективные упругие свойства пород с параметрами их микроструктуры. Выполнен анализ чувствительности построенных петроупругих моделей к параметрам микроструктуры. На основе этого анализа выявлена довольно широкая область возможных значений параметров микроструктуры, экспериментальные значения для которых получить практически невозможно. Полученный результат подтверждает первое защищаемое положение.

В третьей главе представлены результаты обработки данных геомеханических экспериментов, проведенных на сервогидравлическом нагружающем устройстве INOVA для образцов изученных карбонатных пород. Определены величины давлений закрытия трещин, начала зоны линейной упругости; давлений начала дилатация (наступление трещинообразования); давлений, соответствующих пределу упругости (предел прочности при трещинообразовании); предельной прочности (для образцов, для которых эксперимент продолжался за пределом упругости) и также статических модулей Юнга. Эти результаты послужили в дальнейшем основой для определения границ изменения параметров трещиноватости построенных петроупругих моделей.

В четвертой главе представлен разработанный автором подход к определению границ изменения параметра связности пустот, основанный на применении уравнения Козени-Кармана к экспериментальным значениям пористости и проницаемости пород. Результаты применения предложенного в работе подхода к сужению границ изменения параметра связности пустотного пространства, объема трещин и их аспектного отношения подтверждают второе защищаемое положение.

В этой главе также представлено решение обратной задачи по определению параметров петроупругих моделей изученных карбонатных пород с использованием полученных границ для микроструктурных параметров. Построены корреляционные зависимости, связывающие статические и динамические модули Юнга, а также найденные параметры микроструктуры с геомеханическими характеристиками. Для полученных параметров микроструктуры проведен факторный анализ, который позволил разделить их на

две группы: параметры объема и связности пустот и параметры формы пустот. Показано доминирующее влияние параметров первой группы на геомеханические свойства пород. Эти результаты подтверждают третье защищаемое положение.

Четвертая глава содержит также результаты построения многопараметрических зависимостей модулей Юнга (статического модуля, динамического модуля и их отношения) от микроструктурных параметров. Исследована степень влияния каждого параметра на эти модули и определено оптимальное количество параметров в этих зависимостях. Проведено исследование влияния объемной доли микрита, крупных кристаллов и микропор на модули упругости и скорости.

В заключение М. Гасеми выносит главные результаты и выводы работы. Они отвечают поставленным задачам исследования и соответствуют изложению диссертации.

### **Замечания**

1. В работе недостаточно освещен вопрос о влиянии флюидонасыщения на вид полученных корреляционных зависимостей.
2. На с. 178 автором делается вывод о том, что «... имея значения параметра связности пустот, можно значительно увеличить точность оценки величин динамического модуля Юнга», однако отсутствуют какие-либо данные о степени увеличения этой точности.

Отмеченные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общего положительного впечатления от работы.

### **Заключение по диссертационной работе**

По совокупности представленных в диссертации результатов, научной и практической значимости, а также по объему личного вклада автора, данная диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Мохаммадфариды Гасеми «Влияние микроструктуры карбонатных пород на их физико-механические свойства» выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение задачи об установлении взаимосвязей между параметрами микроструктуры различных карбонатных пород, содержащих поры и трещины, и физико-механическими характеристиками этих пород. Решение этой задачи имеет важное научное значение, поскольку позволяет прогнозировать эти характеристики в зависимости от возможных изменений параметров в процессе бурения скважин и разработки месторождений.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным в п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор

Мохаммадфарид Гасеми заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Д.ф.-м.н., заведующий кафедрой физических процессов горного производства и геоконтроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)  
119049, Москва, Ленинский проспект, 4

Винников  
Владимир  
Александрович

Отзыв рассмотрен и обсужден на заседании кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, одно из основных направлений научно-исследовательской деятельности которой – исследования в области геомеханики, геофизики и разрушения горных пород, 20 января 2019 г., протокол № 7, и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Д.ф.-м.н., заведующий кафедрой физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ «МИСиС»

В.А. Винников

К.т.н., доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ «МИСиС»

Я.О. Куткин



Подписи сотрудников В.А. Винникова и Я.О. Куткина заверяю

нач-ка отдела  
ов МИСиС

КУЗНЕЦОВА А.Е.  
21.03.19