

На правах рукописи



Гасеми Мохаммадфарид

**Влияние микроструктуры карбонатных пород на их
физико-механические свойства**

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Научный руководитель: **Баюк Ирина Олеговна**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, лаборатория фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Официальные оппоненты: **Турунтаев Сергей Борисович**
доктор физико-математических наук,
директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

Жуков Виталий Семёнович
доктор технических наук,
главный научный сотрудник, лаборатория комплексных исследований ядерного материала Корпоративного центра исследований пластовых систем (керна и флюиды), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ») Публичного Акционерного Общества «Газпром» (ПАО «Газпром»)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Защита диссертации состоится в 14 часов 21 марта 2019 года на заседании диссертационного совета Д.002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук по адресу: г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «__» _декабря 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

Актуальность темы исследования

Геомеханическое моделирование является современным и эффективным подходом к разработке месторождений углеводородов. Эта методика используется на всех этапах разработки коллектора, включая бурение и заканчивание скважин, эксплуатацию и гидродинамическое моделирование коллекторов и т.д.

Построение геомеханических моделей для любых целей (разведка, эксплуатация или бурение) требует стандартного набора входных данных. Основными параметрами, характеризующими механические и прочностные свойства породы, необходимые для построения любой геомеханической модели, являются статические модули упругости (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и параметры, характеризующие прочностные свойства горных пород (прочность на одноосное сжатие и угол внутреннего трения). Эти физико-механические свойства пород, как правило, называют геомеханическими свойствами. Поровое давление и региональное напряженное состояние являются зависимыми параметрами, определяемыми только после оценки упругих и механических свойств горных пород. Независимо от того, насколько сложна используемая модель, ненадежные входные данные приведут к ошибочным результатам геомеханического моделирования.

Динамические и статические модули упругости, как правило, различаются. Динамические модули измеряют мгновенно, при малых деформациях породы порядка 10^{-6} - 10^{-5} (например, скорости упругих волн). Статические модули измеряют при гораздо больших (на несколько порядков) деформациях и медленных воздействиях. При таких воздействиях происходят различные процессы, которые не успевают развиваться при мгновенном воздействии на породу. К таким процессам относятся закрытие трещин, скольжение по границам зерен и т.д. Это является основной причиной различия динамических и статических модулей.

Геомеханические свойства горных пород можно оценить либо в результате прямых измерений, либо косвенными методами. Прямые измерения предполагают трехосные испытания представительных образцов пород с помощью сервогидравлических нагружающих устройств (прессов) в лабораториях. Однако эти исследования довольно затратны и трудоемки. Кроме того, условия лабораторного эксперимента не всегда могут полностью воспроизвести условия в самом пласте.

Получить полный набор геомеханических параметров пород по данным геофизических исследований скважин (ГИС), геолого-технологических исследований (ГТИ), сейсмических работ невозможно. Они дают

возможность определить лишь динамические модули упругости по скоростям упругих волн и плотности пород, которые могут в несколько раз отличаться от статических модулей. Вследствие этого используют косвенные методы, основанные на построении корреляционных зависимостей между измеренными скоростями упругих волн или динамическими модулями упругости, рассчитанными по ним, и геомеханическими параметрами, измеренным в лаборатории. Корреляционные зависимости, построенные для пород одного типа и одного горизонта, могут отличаться от таковых для пород даже такого же типа, но другого горизонта. Эти корреляционные зависимости определяются спецификой состава и микроструктуры конкретных пород.

В настоящее время не существует теоретических методов, позволяющих оценить геомеханические параметры, и, в частности, статические модули упругости по параметрам состава и микроструктуры пород, как это возможно в теории эффективных сред для динамических модулей. К микроструктурным параметрам можно отнести общую и трещинную пористость, степень связности пустотного пространства, форму и ориентацию пор и трещин. Установление таких зависимостей позволит оценить степень влияния различных параметров, характеризующих состав пород и микроструктуру, на их геомеханические свойства. Помимо этого, такие зависимости дают возможность прогноза изменения геомеханических параметров при изменении одного или нескольких параметров микроструктуры (в частности, параметров трещиноватости в карбонатных коллекторах) в процессе бурения скважин или разработки месторождений.

Цель работы

Установление связей между физико-механическими (геомеханическими) 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.

Основные задачи исследования.

1. Анализ результатов трехосных испытаний образцов карбонатных пород с помощью нагружающего сервогидравлического устройства (пресса) для оценки

- напряжения закрытия трещин;
- интервала напряжений, в котором происходит развитие трещиноватости (дилатация порового пространства);
- величин статических модулей упругости.

2. Установление границ возможного изменения параметров трещиноватости (аспектного отношения трещин, трещинной пористости) и параметра связности пустотного пространства карбонатных и карбонатно-терригенных пород (в дальнейшем изложении - карбонатных пород) на основе анализа результатов измерений фильтрационно-ёмкостных 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 динамического аналогу и коэффициенту общей пористости для изученных пород.

5. Построение бинарных и многопараметрических корреляционных зависимостей между статическим модулем Юнга и параметрами микроструктуры моделей пород. Построение аналогичных зависимостей для отношения динамического модуля Юнга к статическому.

Научная новизна работы

1. Показано, что обратная задача по определению неизмеряемых параметров математических моделей карбонатных пород (микритовых, биоспаритовых и оолитовых известняков, карбонатно-терригенной породы) по скоростям упругих волн в ультразвуковом диапазоне частот, характеризующих строение их пустотного пространства в масштабе зерна (трещинная пористость, форма трещин и пор, степень связности пустот), является некорректной и требует регуляризации.

2. Разработаны методы для оценки ограничений на неизмеряемые параметры математических моделей карбонатных пород, сужающих область неопределенности решений обратной задачи, в частности:

- метод оценки ограничений на значения трещинной пористости и формы трещин на основе анализа данных трехосных испытаний образцов на прессе;
- метод оценки ограничений на значения коэффициента связности пустот на основе измеренных в лаборатории фильтрационно-ёмкостных свойств пород с использованием уравнения Козени - Кармана.

3. На основе результатов факторного анализа, проведенного для микроструктурных параметров моделей карбонатных пород, установлено два латентных фактора, определяющих влияние микроструктуры пород на их

физико-механические свойства, а именно: 1) фактор объема и связности пустот и 2) фактор формы пустот. Показано, что первый латентный фактор имеет доминирующее влияние.

4. На основе результатов факторного анализа построены бинарные и многопараметрические корреляционные зависимости между параметрами микроструктуры моделей эффективных упругих свойств изученных карбонатных пород и величинами модулей Юнга (статического и динамического) и их отношения.

5. Проведен анализ степени влияния различных параметров микроструктуры построенных математических моделей эффективных упругих свойств изученных пород на динамический и статический модули Юнга, а также их отношение.

6. Установлено влияние дополнительных, не включенных в петроупругую модель, текстурных параметров изученных пород, включая объем микрита, размер крупных кристаллов и макропор (диаметр которых больше 30 мкм), характеризующих размеры неоднородностей, на величины динамических, статических модулей Юнга и их отношения.

Защищаемые научные положения

1. Обратная задача определения неизмеряемых параметров микроструктуры пустотного пространства (трещинная пористость, аспектное отношение пор и трещин, параметр связности пустот) порово-трещинных карбонатных коллекторов по данным об эффективных скоростях упругих волн ультразвукового диапазона частот, основанная на математических моделях теории эффективных сред, является некорректной и требует применения регуляризации.

2. Зависимости «напряжения – деформации», полученные в результате испытаний образцов на сервогидравлическом нагружающем устройстве (прессе), и данные о фильтрационно-емкостных свойствах позволяют сузить диапазоны поиска параметров моделей эффективных упругих свойств карбонатных пород и, следовательно, снизить неопределенность оценки значений неизмеряемых параметров микроструктуры пустотного пространства этих пород.

3. Ключевое влияние на значения динамических и статических модулей упругости и их отношение оказывают общая пористость и степень связности пустот, меньшее влияние также оказывает форма пустот (пор и трещин).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость выполненных в диссертации исследований определяется возможностью использования результатов, полученных в данной работе, по следующим направлениям.

Созданные параметрические математические модели эффективных упругих свойств изученных порово-трещиноватых карбонатных горных пород при атмосферных условиях могут применяться для теоретической оценки динамических модулей упругости пород аналогичного типа при изменении параметров моделей, включая тип порозаполняющего флюида.

Результаты факторного анализа, примененного к параметрам микроструктуры петроупругих моделей изученных пород, позволили разделить эти параметры на две группы: 1) параметры объема и связности пустот; 2) параметры формы пустот, и ранжировать эти параметры по степени их влияния на статический и динамический модули упругости.

Построенные бинарные и многопараметрические корреляционные зависимости между микроструктурными параметрами моделей и физико-механическими свойствами изученных пород могут быть использованы для прогноза статического модуля Юнга для пород аналогичного типа по параметрам их микроструктуры, полученным с помощью моделирования, основанного на применении теории эффективных сред. Благодаря этому, становится возможным сократить время и затраты на построение моделей механических свойств (ММС) пород, что является необходимым этапом при создании геомеханической модели месторождения.

Личный вклад автора

Основные результаты работы, полученные лично диссертантом в ходе проведения исследований, включают: построение математических петроупругих моделей для имеющихся образцов карбонатных пород (микритовых, биоспаритовых, оолитовых известняков, карбонатно-теригенной породы), основанных на методе обобщённого сингулярного приближения теории эффективных сред; реализацию этих моделей в виде программного кода на языке Fortran 90; проведение параметрических исследований моделей (анализа чувствительности); активное участие в проведении измерений упругих свойств пород, относящихся к третьей главе данной работы, и обработку результатов экспериментов; разработку методик для ограничения искомых параметров моделей на основе результатов трехосных испытаний образцов на прессе и данных о фильтрационно-ёмкостных свойствах пород, с целью повышения достоверности решения обратных недоопределённых задач; проведение факторного анализа

полученных микроструктурных параметров математических моделей пород и построение бинарных и многопараметрических регрессионных моделей поведения упругих модулей в зависимости от параметров моделей.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях: 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Rock Physics and Geomechanics - Theory and Practice, 11 April 2016; V научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли, математические методы, программное аппаратное обеспечение», 2015; научной конференции молодых ученых и аспирантов в ИФЗ РАН, 2015; 2016; 2017; 2018 гг.

Публикации

Основные научные результаты и положения диссертации опубликованы в 8 научных работах, включая 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и публикацию, индексируемую в базе SCOPUS. Две статьи, содержащие результаты по направлению, имеющему отношение к теме диссертации, опубликованы в журналах, индексируемых в Web of Science.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Содержит 228 страниц текста, 48 рисунков, 26 таблиц и список литературы из 211 наименований.

Благодарности

Автор искренне благодарит своего научного руководителя д.ф.-м.н. И.О. Баяк за постоянную помощь в работе, полезные советы и поддержку на протяжении всех этапов исследования, а также за предоставленный ядерный материал. Особую благодарность автор хотел бы выразить д.ф.-м.н. С.А. Тихоцкому за неоценимую помощь при проведении статистического анализа и обсуждение полученных результатов. Автор благодарен Ю.А. Алхименкову за научно-техническую помощь и вдумчивый анализ результатов данной работы. Автор искренне признателен д.ф.-м.н. Е.И. Суетновой и д.ф.-м.н. Ю.А. Кузьмину за обсуждения и дискуссии, позволившие улучшить качество полученных результатов. Автор выражает глубокую признательность компании НПО СНГС и ее сотрудникам к.т.н. И.Г. Мельникову и А.Л. Шайбакову за проявленную поддержку и предоставленные для исследования

данные. Самые теплые чувства связывают автора с друзьями И.В. Фокиным и Н.В. Дубиней, которым хочется выразить признательность за помощь, внимание и теплую атмосферу, сложившуюся в исследовательской группе. Особую благодарность автор выражает своей жене Сатарии Ш. за личную поддержку.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность и цель настоящей диссертационной работы. Затем сформулированы задачи, защищаемые положения, отражены новизна и практическая значимость исследования. Также коротко представлено теоретическое обоснование для решения обозначенных задач.

Первая глава посвящена литературному обзору мировых исследований для оценки статических и динамических модулей упругости и изучения параметров, оказывающих влияние на их разницу. Согласно эти работам упругое поведение порово-трещиноватых сред контролируется их текстурными параметрами.

В главе представлено краткое описание наиболее распространённых способов моделирования эффективных упругих свойств горных пород на основе их текстурных параметров. Эти методы включают в себя метод дискретных элементов, цифровой керн и теорию эффективных сред.

Рассмотрены различные методы теории эффективных сред, которые используются в геофизических приложениях. Эти методы, можно разбить на три группы на основе их теоретического обоснования: 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 обобщённого сингулярного приближения (ОСП), который в дальнейшем применяется в данной работе для построения петроупругих моделей пород.

Вторая глава представляет анализ экспериментальных данных и описывает математическое моделирование эффективных упругих свойств исследуемых в данной диссертационной работе образцов карбонатных пород.

Данные экспериментального изучения образцов включали: результаты ультразвуковой томографии (УЗТ) керна (метод многоуровневого ультразвукового прозвучивания) и изображения микроструктуры пород, полученных с помощью компьютерной томографии, оптического и растрового электронного микроскопов. Эти исследования позволили оценить степень неоднородности образцов и определить наличие или отсутствие анизотропии упругих свойств. По результатам анализа данных экспериментов породы в масштабе керна были отнесены к изотропным, содержащим

отдельные неоднородности. На основе анализа микроструктуры породы в разных масштабах были построены параметрические математические модели для исследуемых образцов. Для связи измеряемых физических свойств породы с параметрами ее микроструктуры был выбран метод ОСП, поскольку он удовлетворяет критериям применимости к средам, которыми являются порово-трещиноватые породы. Уравнение для метода ОСП можно выразить следующим образом:

$$\mathbf{C}^* = \left\langle \mathbf{C} : [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}^\infty : (\delta\mathbf{C})]^{-1} \right\rangle : \left\langle [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}^\infty : (\delta\mathbf{C})]^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (1)$$

В уравнении (1) треугольные скобки означают усреднение по всем компонентам породы, имеющим разные модули упругости, форму и ориентацию:

$$\langle \mathbf{X} \rangle = \sum_{i=1}^N v^i \tilde{\mathbf{X}}^i, \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{X}}^i = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{a_1} \int_0^{a_2} \mathbf{P}^i(\alpha; \theta, \phi, \psi) \mathbf{X}^i(\alpha; \theta, \phi, \psi) \sin \theta d\alpha d\phi d\theta d\psi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{a_1} \int_0^{a_2} \mathbf{P}^i(\alpha; \theta, \phi, \psi) \sin \theta d\alpha d\phi d\theta d\psi} \quad (3)$$

где \mathbf{X}^i - любое выражение, стоящее в треугольных скобках уравнения (1), относящееся к компоненту i ; v^i - объемная концентрация компонента i ; α - аспектное отношение включений; θ, ϕ, ψ - углы Эйлера, описывающие ориентацию включения в объеме породы; \mathbf{P} - плотность вероятности; \mathbf{C} - тензор упругости каждой компоненты (4-го ранга); \mathbf{I} - единичный тензор 4-го ранга; a_1, a_2, a_3 - полуоси эллипсоидов, моделирующих включения. \mathbf{C}^c - тензор упругости тела сравнения. Далее даны пояснения к членам, входящим в уравнении (1) в индексной форме (все индексы принимают значения от 1 до 3):

$$\delta C_{ijkl} \equiv C_{ijkl} - C_{ijkl}^c, \quad \Gamma_{knlm}^\infty = \frac{1}{4} (\tilde{a}_{klmn} + \tilde{a}_{mnlk} + \tilde{a}_{knlm} + \tilde{a}_{mnlk}),$$

$$\tilde{a}_{knlm} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi n_{mn} \Lambda_{kl}^{-1} \sin \theta d\theta d\varphi, \quad \Lambda_{kl} \equiv C_{knlm}^c n_{mn}, \quad n_{mn} \equiv n_m n_n, \quad (4)$$

$$n_1 = \frac{1}{a_1} \sin \theta \cos \varphi, \quad n_2 = \frac{1}{a_2} \sin \theta \sin \varphi, \quad n_3 = \frac{1}{a_3} \cos \theta.$$

Согласно теории, тело сравнения может быть выбрано произвольно. Это позволяет выбрать его в таком виде, чтобы учесть основные особенности взаимного расположения неоднородностей в породе. Выбор тензора

упругости тела сравнения в виде $\mathbf{C}^c = (1 - f)\mathbf{C}^m + f\mathbf{C}^f$, где \mathbf{C}^c , \mathbf{C}^m и \mathbf{C}^f - тензоры упругости тела сравнения, матрицы и флюида, а f - эмпирический параметр, показывающий степень связности пустотного пространства, позволяет рассматривать различные типы микроструктуры - от изолированных включений в минеральной матрице до экзотического случая, соответствующего эллипсоидальным частицам минерального вещества, окруженных флюидом.

Для рассмотренных в данной работе изотропных образцов, поры и трещины хаотически ориентированы, и их формы описываются едиными аспектными значениями, α^T и α^H соответственно. Следовательно, уравнение (3) упрощается следующим образом:

$$\mathbf{X}^i = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \mathbf{X}^i(\alpha; \theta, \phi, \psi) \sin \theta d\phi d\theta d\psi. \quad (5)$$

Для построения параметрических моделей эффективных упругих свойств (петроупругих моделей) пород, представленных образцами ядра С1, С2, С4, С5, (микритовые, биоспаритовые породы, карбонатно-терригенная порода), была использована модель двойной пористости ("Модель I", Рисунок 1А). Предполагалось, что пустотное пространство представлено пустотами двух видов - порами и трещинами. Форма пор и трещин аппроксимировалась эллипсоидами вращения, которые характеризуются аспектным отношением - аналогом относительной раскрытия пустот. Оба типа пустот имеют хаотическую ориентацию. Степень связности пустот описывается специальным параметром связности, который принимает значения от 0 до 1 (параметр f , входящий в выражение для тензора упругости тела сравнения).

Для оолитового известняка, представленного ядром С6, на основании анализа микроструктуры была построена другая математическая модель эффективных упругих свойств ("Модель II", Рисунок 1Б), в основу которой положена иная модельная среда. Считалось, что модельная среда представлена двумя материалами: 1) трещинно-пористой карбонатной вмещающей матрицей и 2) высокопористыми оолитами. Вторая среда (оолиты) в виде квази-изометричных включений находится в первой среде. Считалось, что параметр связности оолитов отличается от параметра связности пустот во вмещающей карбонатной матрице. Поры внутри оолитовой среды, поры и трещины карбонатной вмещающей матрицы хаотически ориентированы. На основе замеченной разницы между внутренней текстурой оолитовых зерен и карбонатного межзернистого цемента предполагается, что упругие свойства пористых зерен оолитов и карбонатного цемента разные. Это, в свою очередь, свидетельствует о

возможном отличии микроморфологических свойств порового пространства внутри оолитов и межкристаллического порового пространства в карбонатном цементе.

Параметры второй модели следующие: доля оолитовой пористости, аспектное отношение пор карбонатной вмещающей матрицы и оолитовых пор, аспектное отношение трещин карбонатной вмещающей матрицы и коэффициент связности пустотного пространства.

Проведен анализ чувствительности предложенных петроупругих моделей к изменению их параметров. Результаты этого анализа демонстрируют, что построенные параметрические петроупругие модели являются более чувствительными к изменению параметра связности пустот при высоких значениях параметра пустот ($f > 0.6$) и также к изменению значений трещинной пористости и формы трещин. По результатам анализа чувствительности построенных петроупругих моделей пород была выявлена довольно широкая область возможной неопределенности в параметрах микроструктуры, экспериментальные значения для которых получить практически невозможно. Данный результат подтверждает *первое защищаемое положение*.

Третья глава представляет результаты обработки данных трехосных экспериментов, проведенных на прессе INOVA на исследованных автором карбонатных образцах. Определены давление закрытия трещин и начало зоны линейной упругости, давление, при котором начинается дилатация (наступление трещинообразования), давление, соответствующее пределу упругости (предел прочности при трещинообразовании), пиковая прочность (для образцов, для которых эксперимент продолжался за пределом упругости) и также статический модуль Юнга для имеющихся образцов (Рис. 2). Величина статического модуля Юнга при односторонней нагрузке вычисляется путем построения корреляционной зависимости статических величин модуля Юнга в зависимости от соответствующих значений обжимного давления и потом экстраполируется к нулевому обжимному давлению.

На Рис. 3 показаны результаты определений статических и динамических модулей Юнга испытанных образцов, а также их отношения (K-значение).

Проведенные испытания на прессе дали возможность оценить наведенную трещиноватость в процессе нагружения образца и связать изменения в скоростях продольных волн с эволюцией трещиноватости.

Оценены верхние границы аспектного отношения трещин, образовавшихся в процессе деформирования образцов, а также трещинной пористости образцов при нормальных условиях.

В четвертой главе описан предложенный автором диссертации алгоритм для оценки ограничений на параметр связности пустотного пространства. Используя полученные ограничения параметра связности пустотного пространства для всех исследованных в работе карбонатных пород и ограничения на трещинную пористость и аспектное отношение трещин, автор решил обратную задачу по оценке параметров построенных математических моделей эффективных упругих свойств образцов карбонатных пород С1, С2, С3, С4, С5 и С6. Найдены корреляционные зависимости, позволяющие связывать статические и динамические модули Юнга, а также параметры микроструктуры моделей с физико-механическими характеристиками карбонатных пород. Проведен статистический анализ полученных результатов.

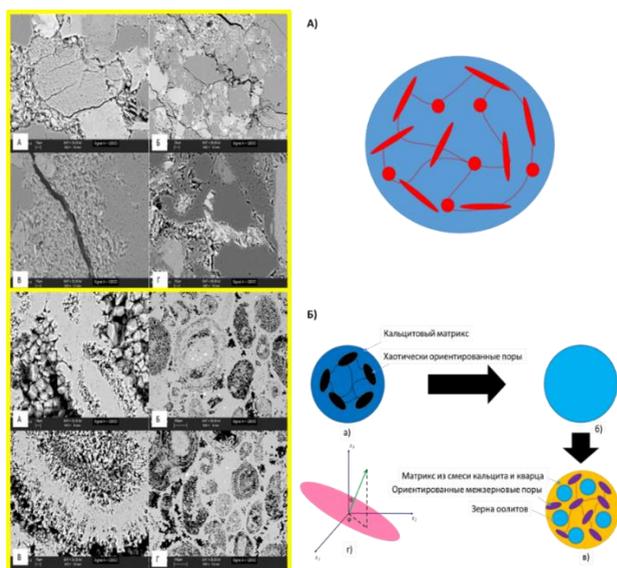


Рис. 1. Изображения РЭМ и соответствующая модельная среда для образцов (а) С3, и (б) С6.

Бинарная корреляционная зависимость между величинами динамических и статических модулей Юнга построена как классический подход для оценки величин статического модуля Юнга. Исходя из полученных корреляционных зависимостей, можно заметить, что значение коэффициента детерминации для образцов с низкими значениями коэффициента общей пористости и высокими величинами модулей Юнга выше, чем для образцов с высокими значениями коэффициента общей пористости. Это свидетельствует о том, что

применение эмпирических корреляционных зависимостей для оценки статических модулей упругости на основе динамических величин для горных пород с низким значением коэффициента общей пористости (<5%) может быть приемлемым подходом и, наоборот, применение эмпирических корреляционных зависимостей для горных пород с высоким значением коэффициента общей пористости может привести к неверным результатам.

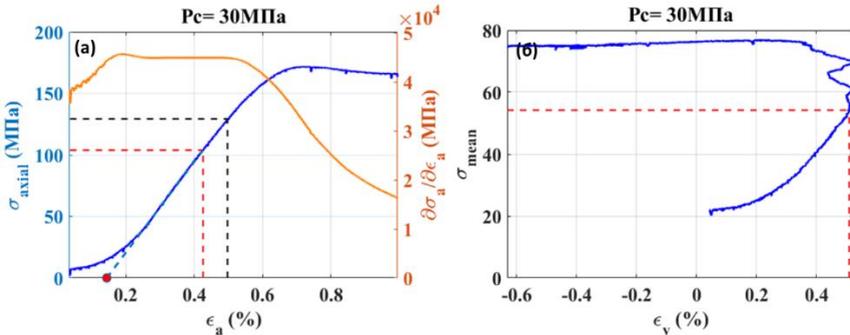


Рис. 2. Графики зависимостей: (а) осевая деформация-осевое напряжение; (б) объемная деформация-среднее напряжение. Штрихи иллюстрируют давление начала дилатации (красный цвет) и предел линейной упругости (черный цвет). Красной точкой показана пористость трещин, которые закрылись в процессе нагружения образца.

Статические и динамические модули Юнга и их отношение

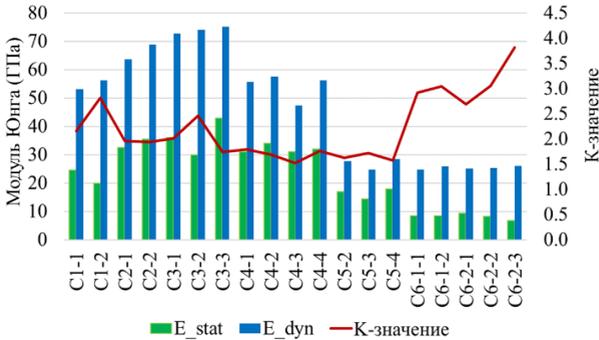


Рис. 3. Результаты определения статических (зеленые столбцы), динамических (синие столбцы) модулей Юнга (в ГПа) и их отношения (К-значение, красная линия), для исследованных образцов карбонатных пород.

Для исследованных в данной работе образцов по данным лабораторного эксперимента (измерения скоростей продольных и поперечных упругих волн)

инвертированы параметры микроструктуры, включая коэффициент связности порового пространства (f), трещинную пористость (ϕ_c), аспектное отношение пор ($\alpha^{пор}$) и аспектное отношение микротрещин (α_c). Для оценки параметров, представляющих характеристики микроструктуры, применен метод оптимизации *прямого поиска*. Так как число неизвестных параметров, представляющих характеристики микроструктуры больше, чем число известных параметров (измеренные скорости упругих волн при лабораторных условиях), задача является недоопределенной. Для недоопределенной задачи число решений бесконечное. Ограничение диапазона поиска для каждого параметра может значительно повысить точность его оценки. Вследствие этого вводились ограничения на значения искомым параметров, чтобы сузить диапазон поиска алгоритма оптимизации, увеличить точность результатов и уменьшить их неопределённость. В результате решения обратной задачи по определению параметров петроупругих моделей пород было установлено, что параметр связности пустотного пространства пропорционален натуральному логарифму отношения проницаемости к пористости. Это дало возможность построить алгоритм определения границ измерения параметра связности, основные принципы которого изложены ниже.

Поскольку параметр f отражает степень гидравлической связности пустотного пространства, для оценки ограничений на параметр f применено уравнение Козени - Кармана, которое выражается следующим образом:

$$k = \frac{(\phi - \phi^{перк})^3 d^2}{36 K_0 \tau^2 (1 - \phi + \phi^{перк})^2}, \quad (5)$$

где k – гидравлическая проницаемость; ϕ и $\phi^{перк}$ - коэффициент пористости и пористость перколяции. K_0 - фактор формы зерен и пор; τ - извилистость поровых каналов. Неизвестные параметры уравнения Козени – Кармана ($\phi^{перк}$, K_0 и τ) определены методом N-мерной сетки на основе измеренных в лаборатории фильтрационно-емкостных свойств (проницаемости и пористости).

С использованием уравнения Козени - Кармана была построена некая модельная среда, приоритетом для построения которой была максимизация коэффициента проницаемости с максимальным сохранением близости других текстурных характеристик исходному образцу. Эту среду называли *локальной идеальной средой*, поскольку пористость и фактор формы этой среды аналогичны исследуемому образцу. Оценка параметра f в масштабе локальной идеальной среды, которая имеет максимальное значение проницаемости для породы с теми же микроструктурными параметрами, что и рассматриваемая

порода, (за исключением извилистости), приводит к результатам, которые являются верхней границей параметра f (Рис. 4).

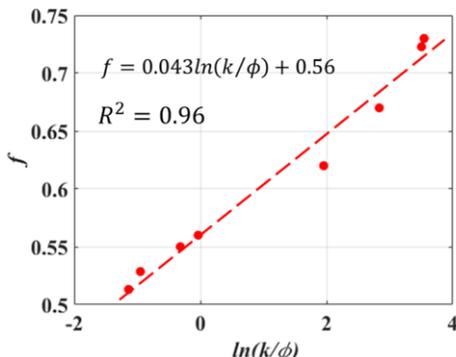


Рис. 4. Зависимость, определяющая верхнюю границу параметра связности для исследованных карбонатных пород.

После определения граничных значений искомым параметрам моделей, исследуемых в данной работе карбонатных образцов петроупругих моделей (модель I и II) решалась обратная задача по их определению. Результаты применения предложенного в работе подхода к сужению границ параметра связности пустотного пространства, объема трещин и их аспектного отношения подтверждают *второе защищаемое положение*.

Для полученных параметров микроструктуры моделей исследованных карбонатных пород проведен статистический анализ для исследования их связи с упругими характеристиками. Была исследована значимость корреляции между предполагаемыми независимыми параметрами (предикторами) и значимость корреляции между предикторами с наблюдениями (модулями упругости). Для этой цели применялись методы проверки статистических гипотез. После установления наличия связи между текстурными параметрами с величинами модулей упругости был проведен регрессионный анализ для аппроксимации этих связей математическими функциями. Эти зависимости показаны на Рис. 5 для общей пористости. Построению бинарных зависимостей предшествовал расчет коэффициентов детерминации между модулями упругости (и их отношением) и параметрами петроупругих моделей. Высокие значения коэффициентов детерминации (> 0.8) дали основания построить бинарные корреляционные зависимости для всех найденных микроструктурных параметров.

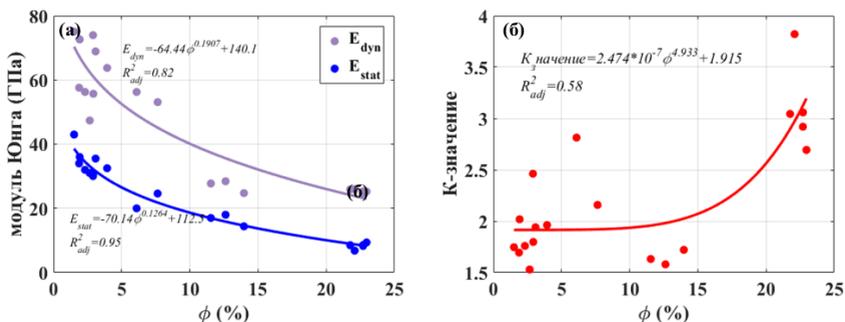


Рис. 5. Бинарная корреляционная зависимость между (а) величинами динамических и статических модулей упругости и коэффициентом общей пористости, (б) К-значениями и коэффициентом общей пористости.

На основе построенных бинарных корреляционных зависимостей можно заключить, что с увеличением коэффициента общей пористости, параметра связности пустот, трещинной пористости и аспектного отношения трещин величины модулей Юнга уменьшаются, а К-значения увеличиваются. Аспектное отношение пор имеет упрочняющее влияние, т.е. с увеличением аспектного отношения пор (более сферичные пустоты) величины модулей Юнга увеличиваются, и К-значение уменьшается.

Для параметров микроструктуры построенных моделей пород был проведен факторный анализ. Использовался метод максимального правдоподобия. В результате проведения факторного анализа было получено, что параметры микроструктуры можно разделить на две группы: 1) параметры объема и связности пустот и 2) параметры формы пустот. Показано доминирующее влияние параметров первой группы на статический и динамический модули Юнга и их отношение. По степени влияния на физико-механические характеристики пород микроструктурные параметры можно ранжировать следующим образом (по степени убывания влияния): общая пористость, связность пустот, трещинная пористость, аспектное отношение трещин, аспектное отношение пор. Результаты применения факторного анализа подтверждают *третье защищаемое положение*.

Помимо бинарных корреляционных зависимостей построены многопараметрические корреляционные зависимости, с помощью которых можно исследовать взаимное влияние параметров предложенных регрессионных моделей на модули упругости. Исходя из того, что параметры модели имеют разную значимость, существует оптимальное количество независимых параметров для описания связи. Превышение оптимального количества независимых параметров приводит к добавлению шума в

регрессионную модель. Для выбора важнейших параметров и построения многопараметрических регрессионных моделей с оптимальным числом параметров был применен алгоритм Тутубалина (1992). На Рис. 6 показаны результаты применения алгоритма. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что, помимо значений коэффициента общей пористости (ϕ_t), имея значения параметра связности пустот, можно значимо увеличить точность оценки величин динамического модуля Юнга. Однако достигнуть наименьшей погрешности при оценке статистического модуля Юнга удается, когда, помимо значений коэффициента общей пористости, используются как значения, параметра связности пустот (f), так и значения трещинной пористости (ϕ_c).

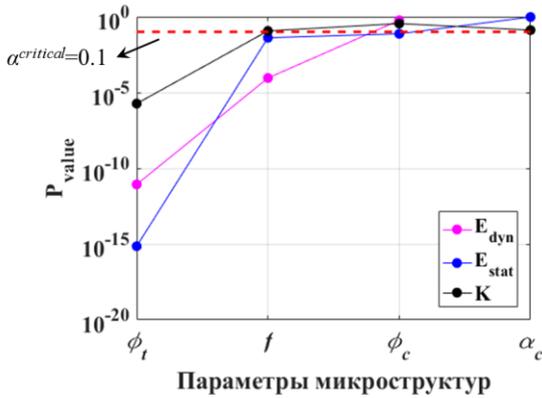


Рис. 6. Статистическая значимость увеличения точности регрессионной модели в результате добавления независимых параметров.

Результирующие регрессионные модели определяются следующим образом:

$$\ln(E^{dyn}) = 4.1066 - 0.3070 \ln(\phi_t) - 0.3029 \ln(f) \quad (6)$$

$$R_{adj} = \sqrt{0.919} = 0.96$$

$$\ln(E^{stat}) = 2.5469 - 0.2160 \ln(\phi_t) - 0.8343 \ln(f) - 0.0914 \ln(\phi_c) \quad (7)$$

$$R_{adj} = \sqrt{0.94} = 0.97$$

$$\ln(K) = 1.2319 + 0.2100 \ln(\phi_t) + 0.5668 \ln(f) \quad (8)$$

$$R_{adj} = \sqrt{0.53} = 0.73$$

Поскольку объем экспериментальных данных, для которых получены результаты, был небольшой (20 образцов) для статистических характеристик параметров, представленных в этой работе, включая коэффициенты корреляции, коэффициенты детерминации бинарных регрессионных зависимостей и результаты, полученные с помощью факторного анализа, был проведен бутстреп-анализ. Целью этого анализа была оценка представительности полученных результатов. Для построения доверительных интервалов для вышеуказанных параметров, был применен вариант метода бутстрепа, имеющий в англоязычной литературе название ВСа (bias-corrected and accelerated bootstrap interval), который решает проблемы асимметрии и неунимодальности распределения.

Исходя из результатов бутстреп-анализа, можно заключить что: (а) значения коэффициента корреляции между микроструктурными параметрами с динамическими и статическими модулями упругости устойчивы и не меняются значительно при модификации выборки, (б) значения коэффициента детерминации для регрессионных зависимостей, построенных между параметрами формы пустот и динамическими и статическими модулями Юнга, имеют более широкие доверительные интервалы; (в) значения нагрузок первого латентного фактора (объемный фактор) являются устойчивыми и не меняются резко при модификации выборки (узкий доверительный интервал); (г) значения нагрузок второго латентного фактора (фактор формы) являются менее устойчивыми по сравнению со значениями нагрузок объемного фактора.

Упругие свойства карбонатных образцов, исследованных в данной работе, имеют прямую связь с объемной долей микрита. Для образцов, у которых объемная доля микрита больше, наблюдаются повышенные значения скоростей упругих волн и величин динамических и статических упругих модулей.

Значения скоростей упругих волн и величины динамических и статических модулей упругости прямо пропорциональны размеру крупных кристаллов. Для образцов, у которых средний размер крупных кристаллов больше, модули Юнга выше.

На Рис. 7 показаны зависимости прочностных свойств пород от параметров микроструктуры их пустотного пространства. Можно сделать вывод, что увеличение параметра связности пустот, трещинной пористости и аспектного

отношения трещин приводит к уменьшению значений угла внутреннего трения и прочности на одноосное сжатие. Для образцов, содержащих поры с высокими значениями аспектного отношения, значения угла внутреннего трения и прочности на одноосное сжатие выше.

Зависимости коэффициента Пуассона от параметров микроструктуры пород установлено не было.

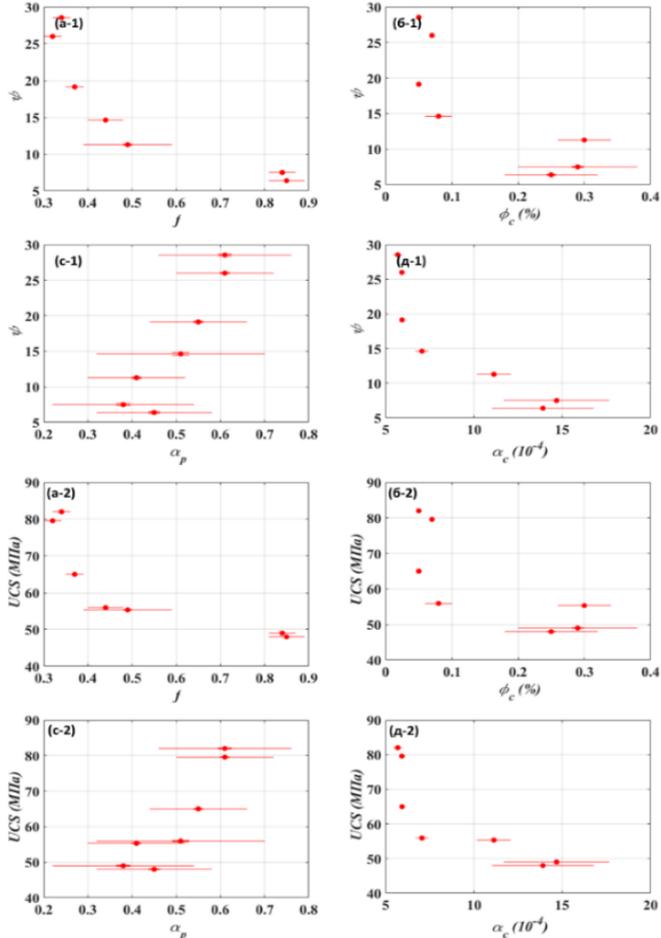


Рис. 7. Бинарные корреляционные зависимости между параметрами, характеризующими пустотное пространство, и прочностными характеристиками пород - углом внутреннего трения (ψ) и прочностью на одноосное сжатие (UCS).

Заключение

Основной задачей исследования было установление взаимосвязей между параметрами микроструктуры различных карбонатных пород, содержащих поры и трещины, и физико-механическими характеристиками этих пород. Последние включали в себя динамический и статический модули Юнга, динамический коэффициент Пуассона, который обычно принимают равным статическому, прочность на одноосное сжатие и угол внутреннего трения. Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Рассмотрены основные причины различий между величинами динамических и статических модулей упругости. Методы моделирования эффективных упругих свойств горных пород сгруппированы на основе подходов к анализу влияния их микроструктурных параметров. Обоснован выбор метода обобщенного сингулярного приближения для построения петроупругих моделей пород, содержащих трещины и поры.

2. Построены петроупругие модели пяти карбонатных и одной карбонатно-терригенной породы. Для построения моделей использованы данные о микроструктуре пород и результаты многоуровневого ультразвукового прозвучивания образцов пород. На основе этих данных породы отнесены к изотропным, содержащим отдельные неоднородности. Параметры микроструктуры петроупругих моделей пород включают: общую и трещинную пористость, параметр связности пустот, аспектное отношение пор и трещин. Исследована чувствительность построенных моделей к микроструктурным параметрам.

3. Проведенный анализ чувствительности построенных петроупругих моделей пород выявил довольно широкую область возможных значений параметров микроструктуры. С целью сужения этой области проанализированы данные трехосных одностадийных и многостадийных испытаний на изучаемых образцах 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 поведения при нагрузке образца определены максимальное значение аспектного отношения трещин и максимальное значение коэффициента трещинной пористости.

4. Предложен метод для оценки ограничений сверху на параметр связности пустот. С использованием этого результата, а также ограничений на трещинную пористость и аспектное отношение трещин решена обратная задача по определению параметров микроструктуры шести изученных пород. Для исследования влияния оцененных параметров пустотного пространства на физико-механические характеристики пород оценена степень корреляции

между параметрами микроструктуры и модулями упругости (статическим и динамическим модулями Юнга и их отношением). Установленная высокая корреляция между указанными величинами явилась основанием для построения бинарных регрессионных зависимостей.

5. С использованием факторного анализа установлена степень влияния различных микроструктурных параметров петроупругих моделей на модули Юнга (статический и динамический) и их отношение (K -значение). По степени влияния на модули Юнга (статический и динамический) и их отношение параметры моделей разделены на две группы: 1) параметры, характеризующие объем и связность пор и трещин и 2) параметры формы пустот. Первая группа параметров оказывает более заметное влияние на модули и их отношение по сравнению со второй группой. Наиболее значимым параметром, оказывающим влияние на модули Юнга и их отношение, является общая пористость. На втором месте по значимости находится связность пустот, на третьем – трещинная пористость. Показано, что трехпараметрическую зависимость от параметров объема и связности пустот (пор и трещин) имеет смысл строить только для статического модуля Юнга. Для динамического модуля Юнга и K -значения достаточно ограничиться параметрической зависимостью, включающей два параметра – общую пористость и параметр связности пустот.

Таким образом, в работе решена задача 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.

Список публикаций по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК

1. Гасеми М.Ф., Баюк И.О. Петроупругая модель оолитового известняка в масштабе керна // Экспозиция Нефть Газ. 2018. Т.63. № 3. С. 36 - 40.
2. Гасеми М.Ф., Баюк И.О. Петроупругое моделирование карбонатных пород-коллекторов с использованием модели двойной пористости // Экспозиция Нефть Газ. 2018. Т. 65. № 5. С. 21 - 25.

В изданиях, индексируемых в SCOPUS

3. Ghasemi M.F., Bayuk I.O., Alkhimenkov Yu.A. A new approach for relating dynamic elastic properties and geomechanical parameters based on rock physics modeling, // Материалы 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Rock Physics and Geomechanics - Theory and Practice, 11 – 14 April 2016.

В изданиях, индексируемых в Web of Science

4. Ghasemi M.F., Ghiasi M.M., Mohammadi A.H., Zendehboudi S. Regional tectonic state and poro-thermo-elasticity analysis of near wellbore zone in field development plan: Utilization of an uncoupled approach // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 46. P. 615-636.
5. Ghasemi M.F., Ghiasi M.M., Mohammadi A.H., Garavand A., Noorollahi Y. Coupled Thermo-Poro-Elastic modeling of near wellbore zone with stress dependent porous material properties // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 52. P. 559-574.

Прочие публикации

6. Гасеми М. Построение 3D модели механических свойств для гидро-геомеханического моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений и результатов лабораторных анализов керна // Материалы V научно-практической конференции суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли, математические методы, программное аппаратное обеспечение, 2015, <https://drive.google.com/file/d/0B4D0IrwH0h5UNUNIWjY2NTI1QkE/view>.
7. Гасеми М., Алхименков Ю.А., Баюк И.О. «Построение 3D модели механических свойств для гидро-геомеханического моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений и результатов лабораторных анализов керна» // Тезисы научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 2015, http://www.ifz.ru/uploads/media/Gasemi_mol2015.pdf.
8. Гасеми М. Изучение влияния состава и микроструктуры на геомеханические свойства горных пород // Тезисы научной конференции молодых учёных и аспирантов, 25-26 апреля 2016 г., ИФЗ РАН, Москва, с. 25.

9. Гасеми М. Использование многопараметрических регрессионных зависимостей для оценки модулей упругости и проницаемости карбонатных пород // Тезисы научной конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН, 24-26 апреля 2017 г., с. 27

10. Гасеми М. Теоретические и экспериментальные исследования карбонатных пород для оценки статических модулей упругости // Тезисы научной конференции молодых учёных и аспирантов, 23-24 апреля 2018. <http://www.ifz.ru/conference/nauchnaja-konferencija-molodykh-uchjonykh-i-aspirantov-2018/>.

Подписано в печать: 14.12.2018 г
Формат 64×84/16. Объем 1,0 усл. печ. л.
Заказ № 15032 Тираж - 120 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(977) 518-13-77, (499) 788-78-56
www.autoreferat.ru riso@mail.ru