

## ОТЗЫВ

оппонента на диссертационную работу **Ялаева Тагира Рустамовича**  
**«Методика построения обобщенных моделей эффективных упругих и тепловых  
свойств пород с учетом их внутренней структуры и флюидонасыщения»,**  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых»

**Актуальность исследований. Объект и предмет исследований.** В настоящее время в мире интенсивно развиваются технологии добычи нетрадиционных углеводородов и, согласно проекту “Энергетическая стратегия России на период до 2035 года”, их влияние на состояние мировых энергетических рынков будет только возрастать. При разработке месторождений нетрадиционных запасов нефти велика роль методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Одним из 4 видов МУН являются тепловые. Для применения таких методов необходимо знать тепловые свойства породы (теплопроводность, объемную теплоемкость, температуропроводность, тепловой коэффициент линейного расширения), однако часто их непосредственное измерение провести невозможно. В таких случаях используют теоретические подходы: методы теории эффективных сред, методы искусственных нейронных сетей, правила смещений, цифровые модели и др. При этом точные решения существуют только для простых модельных сред, например, для слоистой среды или для неограниченной среды с малой концентрацией сферических включений. На сегодняшний день не существует ни одного надежного прибора для измерения тепловых свойств по стволу скважины, технологии проведения акустического каротажа наиболее совершенны и входят в набор стандартных каротажей различных компаний. Предлагаемые на сегодняшний день корреляционные зависимости между тепловыми и упругими свойствами не обладают желаемой общностью и работают на узких наборах данных и/или только для моделирования отдельно упругих или тепловых свойств.

Вследствие этого возникает необходимость разработки таких подходов, в рамках которых можно связать упругие и тепловые свойства горных пород для определения последних на основе модели физических свойств породы и соответствующих экспериментальных данных по упругим свойствам породы. На решение этой задачи и направлены исследования, проводимые в данной диссертационной работе. Исходя из вышеизложенного, **актуальность** таких исследований сомнений не вызывает.

**Целью диссертационной работы** является повышение достоверности определения макроскопических упругих и тепловых свойств основных типов коллекторов углеводородов в различных состояниях флюидонасыщения в условиях отсутствия возможности проведения непосредственных прямых измерений. Для выполнения намеченной цели в диссертационной работе были поставлены 3 задачи:



1. Создание и верификация обобщенных параметрических математических моделей упругих и тепловых свойств карбонатных и терригенных типов пород, построенных по результатам изучения керна, а также композитных сред, изготовленных на основе шлама этих пород.

2. Создание методики решения задачи флюидозамещения для эффективной теплопроводности на примере нескольких коллекций керна карбонатных и терригенных типов пород.

3. Разработка методики одновременного восстановления эффективной теплопроводности и упругих свойств пород по физическим свойствам искусственных композитов, изготовленных на основе шлама пород.

Со всеми поставленными задачами диссертант успешно справился.

Все основные результаты диссертации являются **новыми**; они опубликованы в рецензируемых журналах, включая и журналы из перечня ВАК, а также апробированы на всероссийских и международных научных конференциях. **Новизна полученных результатов** заключается, главным образом, в создании единых математических параметрических моделей упругих и тепловых свойств карбонатных и терригенных типов пород, учитывающих особенности их строения и позволяющих рассчитывать одни свойства через другие.

**Достоверность полученных результатов и выводов.** Достоверность предложенных математических моделей и разработанных методик и алгоритмов подтверждается согласованием полученных результатов с экспериментальными данными.

**Значимость полученных результатов.** Полученные в диссертации результаты могут быть полезны в следующих направлениях:

- в условиях бурения без выноса керна представляется актуальной предложенная в диссертации методика одновременного определения упругих свойств и теплопроводности пород по шламу;

- для теоретического прогноза теплопроводности по известным упругим свойствам в зависимости от пористости, емкости трещин, относительного их раскрытия, связности порового пространства, насыщающего флюида и других параметров модели могут применяться предложенные в работе параметрические модели карбонатных и терригенных типов пород;

- для оценки теплопроводности горных пород при приложении одноосной нагрузки могут быть использованы результаты расчетов параметров структуры пород, описывающих изменение относительного раскрытия элементов порового пространства математической модели песчаника в аналогичных условиях.

**Общая характеристика работы.** Текст диссертации изложен на 129 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 99 наименований; содержит 49 рисунков и 14 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна работы, раскрыта ее практическая и теоретическая значимость.



*Первая глава* диссертации глава представляет собой обзор исторических и современных методов математического моделирования эффективных упругих и тепловых свойств горных пород. В ней рассматриваются различные методы математического моделирования эффективных свойств, в частности, методы на основе нейронных сетей и случайных функций, корреляционные методы, методы на основе правил смешения, цифровых моделей и др. Методы условно поделены на 5 групп: инженерные методы, эмпирические методы, подходы, основанные на нейронных сетях, модели цифрового ядра и эффективные модели на основе теории эффективных сред. Приведены аналитические соотношения между эффективными свойствами пород и параметрами моделей этих методов. Проведен сравнительный анализ этих групп методов, указаны ограничения их использования, их преимущества и недостатки. На основании проведенного анализа автор диссертации делает обоснованный вывод о предпочтительности подходов теории эффективных сред, позволяющих установить связь между упругими и тепловыми свойствами среды с учетом основных особенностей структуры среды.

Диссертант не ограничился традиционным для первой главы анализом текущего состояния научной проблемы, а провел в ней исследования, итогом которых стал первый из основных результатов работы, а именно была получена формула для расчета эффективной теплопроводности микронеоднородной среды на основе метода Т-матрицы. Кроме того, в конце первой главы были рассмотрены наиболее известные методы измерения тепловых свойств: метод оптического сканирования, метод разделенного стержня и метод линейного источника.

*Вторая глава* посвящена моделированию физических свойств карбонатных и терригенных типов пород, а также решению задачи флюидозамещения для теплопроводности. Первые три параграфа являются вспомогательными. В них формулируются основные принципы методики построения обобщенных моделей физических свойств горных пород, приводится уравнение связи тепловых и упругих свойств горной породы с параметрами ее структуры, предложенное Т.Д. Шермергором, а также рассматриваются основные этапы построения математических моделей эффективных физических свойств пород, основанных на едином описании их микроструктуры. Следует отметить, что сформулированные здесь принципы методики построения моделей во многом совпадают с таким направлением механики обобщенных континуумов, как метод структурного моделирования (см., например, Павлов И.С., Потапов А.И. Структурные модели в механике нанокристаллических сред // Доклады академии наук, 2008, Т. 421, № 3, с. 348-352).

Следующие три параграфа этой главы содержат очень важные результаты диссертации. В них разрабатываются две модели физических свойств коллекторов: одна модель для карбонатного типа пород, вторая - для терригенного типа пород. Эти модели реализованы в виде программ на языке Fortran-90 с компилятором Intel Visual Fortran Composer XE 2011 с использованием стандартной библиотеки IMSL для решения задач оптимизации с ограничениями на искомые параметры. Для



верификации этих моделей с помощью трехэтапного алгоритма решается задача флюидозамещения для теплопроводности. Приводятся результаты сравнения расчетной и экспериментальной эффективной теплопроводности образцов, насыщенных моделью пластовой воды, нефти и воздуха.

Кроме того, проводится сравнение результатов расчета теплопроводности с помощью предлагаемого метода и широко используемых методов Лихтенеккера и Рой-Адлера. Показано, что результаты расчетов по предлагаемому методу более точные по сравнению с другими методами, поскольку в этом случае расхождение экспериментальных и теоретических значений теплопроводности (метода оптического сканирования).

*В третьей главе* диссертационной работы рассматривается вопрос об установлении связи упругих свойств и теплопроводности при атмосферных условиях, а также в условиях напряженного состояния на примере песчаника Бентхаймер. Данная глава посвящена, в основном, экспериментальным исследованиям. Здесь приводятся результаты измерений физических свойств различных образцов песчаника Бентхаймера при комнатной температуре и атмосферном давлении, а также в условиях приложенной осевой нагрузки. С учетом полученных экспериментальных данных приведены результаты параметрических исследований данной модели эффективных свойств. На основании построенной модели установлена связь между теплопроводностью породы и скоростями продольных и поперечных волн. Эта связь была использована для прогноза теплопроводности песчаника Бентхаймер по данным об упругих свойствах породы.

Отрадно заметить, что автор диссертации принимал активное участие в получении, обработке и анализе экспериментальных данных: пористости, проницаемости, плотности, теплопроводности сухих и образцов, насыщенных моделью пластовой воды, а также упругих динамических характеристик.

*Четвертая глава* посвящена решению задачи по восстановлению упругих и тепловых свойств горных пород по данным о физических свойствах композитов, изготовленных из их фрагментов (шлама). В ней рассматривается авторская методика по определению эффективных упругих свойств и теплопроводности горных пород по соответствующим свойствам образцов композитного материала, изготовленного из фрагментов этой породы. На основании предложенной двухстадийной математической модели физических свойств искусственного образца (композита) на основе теории эффективных сред в приближении обобщенного сингулярного приближения были проведены расчеты эффективных свойств породы по данным о физических свойствах, измеренных на образцах композита. Оказалось, что среднее отклонение по скоростям продольных и поперечных волн и теплопроводности не превосходит 10% при допущении 5%-ой погрешности экспериментальных данных. Кроме того, был проведен параметрический анализ модели, позволяющий установить ее наиболее чувствительные параметры.



В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

### **Замечания по диссертации**

1. В конце стр. 53 имеется фраза: “Если наблюдается **упорядоченность** формы компонент породы, то это может привести к **анизотропии** ее физических свойств”. Эта фраза нуждается в пояснении, т.к. более логичным представляется появление анизотропии при **отсутствии** упорядоченности.

2. В п.2.3 “Основные этапы построения математических моделей эффективных физических свойств пород, основанных на едином описании их микроструктуры” содержится подробное описание первых 4 этапов, но к заключительному 5-му этапу “Проведение параметрического исследования модели, то есть определение чувствительности модели к изменению ее параметров” комментарии отсутствуют, хотя пояснение, что означает в данном контексте “чувствительность модели”, на мой взгляд, необходимо.

3. Последний столбец таблицы 3.2 на стр. 76 содержит значения коэффициента Пуассона, составляющие 5-6 ГПа, в то время как из теории упругости известно, что коэффициент Пуассона – **безразмерная** величина, значения которой лежат в интервале от -1 до 0.5.

4. В заключении формулировка первых двух результатов начинается со слов “В первой главе”, “Во второй главе”. Такой стиль изложения результатов приводит к ожиданию начала формулировки третьего результата со слов “В третьей главе”, однако выбранный диссертантом стиль не получает продолжения в результатах 3-6. В таком случае автору не следовало акцентировать внимание читателя на том, что первые 2 результата были получены в первых двух главах диссертации соответственно.

5. Список цитируемой литературы диссертации содержит 99 наименований, из которых лишь 25 источников русскоязычные, причем авторами 9 из них являются диссертант и его научный руководитель. В связи с таким беспрецедентно малым для диссертации количеством цитируемой русскоязычной литературы возникает вопрос: “Это недоработка диссертанта или же есть какие-либо иные причины такого явления?”

Тем не менее, перечисленные замечания не снижают научной ценности диссертации и не ставят под сомнение полученные результаты.

### **Заключение официального оппонента**

Диссертация Ялаева Т.Р. представляет собой законченную научно-исследовательскую квалификационную работу, в которой гармонично сочетаются теоретические, численные и экспериментальные исследования. Работа написана грамотным научным языком и хорошо оформлена. Она выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение задачи разработки таких подходов, в рамках которых можно связать упругие и тепловые свойства горных

пород для определения последних по экспериментальным данным и на основе модели физических свойств породы.

Основные положения и результаты диссертации являются новыми; они докладывались на многочисленных российских и международных конференциях, а также были опубликованы в 3 рецензируемых журналах из перечня ВАК. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы.

Результаты диссертации имеют существенное значение для совершенствования методов увеличения нефтеотдачи при использовании технологий добычи нетрадиционных углеводородов.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК, стиль и порядок изложения способствуют пониманию содержания диссертационной работы.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата наук, а ее автор Т.Р. Ялаев достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Я, Павлов Игорь Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Заместитель директора по научной работе

Института проблем машиностроения РАН – филиала

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

Российской академии наук»,

доктор физико-математических наук, доцент  Павлов Игорь Сергеевич

603024, г. Нижний Новгород, Белинского ул., д. 85

Тел./факс (831) 432-03-00 e-mail: [ispavlov@mail.ru](mailto:ispavlov@mail.ru)

26 сентября 2017 года

Подпись И.С. Павлова заверяю.

Ученый секретарь Института проблем машиностроения РАН – филиала

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

Российской академии наук»,

к.т.н.



Мотова Елена Алексеевна