

На правах рукописи



Ялаев Тагир Рустамович

**МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ  
ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ И ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОРОД С  
УЧЕТОМ ИХ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ И ФЛЮИДОНАСЫЩЕНИЯ**

Специальность 25.00.10

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва

**Научный руководитель:** **Баяк Ирина Олеговна**  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник лаборатории 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)

**Павлов Игорь Сергеевич**  
доктор физико-математических наук,  
заместитель директора по научной работе, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)**

**Защита диссертации** состоится 12 октября 2017 г. в 14:00 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: 123242, 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](http://www.ifz.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации [vak.ed.gov.ru](http://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** «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Согласно проекту «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» от 2016 года дальнейшее развитие технологий добычи нетрадиционных углеводородов будет оказывать наибольшее влияние на конъюнктуру мировых энергетических рынков. В Канаде современные технологии позволили уменьшить издержки производства нефти из битуминозных песчаников в 3,5 раза, что привело к увеличению объемов доказанных запасов нефти и битума до 23,9 млрд. т. В результате, в 2003 году Канада стала вторым государством после Саудовской Аравии по объемам доказанных запасов нефти и битума [Богданчиков, 2006]. Таким образом роль третичных методов нефтедобычи или методов увеличения нефтеотдачи (МУН) как методов, используемых при разработке месторождений нетрадиционных запасов нефти продолжает расти.

Существует 4 основных типа МУН: химические, газовые, микробиологические и тепловые. Для первого типа, как правило, используют поверхностно-активные вещества (ПАВ) или другие химические вещества для уменьшения сил, удерживающих нефть в порах [Han et al., 2013]. Для второго – углекислый газ или обогащенный природный газ для смешения его с нефтью, что облегчает его вытеснение из порового пространства. Для третьего – микроорганизмы для улучшения нефтевытесняющих свойств пород, очистки и неполного разложения нефти, а также удаления закупорок в проницаемых каналах [Donaldson et al., 1989]. В основе четвертого типа лежит тепловое воздействие на пласт, используемое для уменьшения вязкости нефти и/или для разложения ее тяжелых фракций до более легких [Robertson, 1988]. Отдельно выделяют метод плазменно-импульсного воздействия, который воздействует на пласт посредством сверхзвуковой ударной волны, что приводит к выносу коагулирующих веществ и увеличению проницаемости [Pashchenko, Ageev, 2016]. Этот метод еще не получил широкое распространение и находится на этапе проведения полевых испытаний.

По данным министерства энергетики США количество проектов в 2008 году, в которых вовлечены тепловые МУН, составило 24% от всех проектов с использованием МУН. В большей степени, не менее 80%, тепловые МУН применяются на осадочных породах терригенного типа [Alvarado, Manrique, 2010]. Использование этих методов актуально и для российских регионов. Например, за счет их применения на

месторождениях Сахалина ПАО «НК «Роснефть» ежегодно добывает около 20% нефти этого региона [Богданчиков, 2006]. Активно технологии теплового МУН испытывает ПАО «Татнефть». Так с 2006 года на Ашальчинском месторождении проводятся испытания модифицированной технологии теплового воздействия на пласт через двухустьевые параллельные горизонтальные скважины [Боксерман, 2011; Хисамов и др., 2006].

Для оценки эффективности тепловых МУН часто используют, так называемые, компьютерные симуляции резервуара [Chekhonin et al., 2012]. Путем задания тепловых свойств пород они позволяют рассчитывать движение тепловых потоков в резервуаре и изменение температурного поля во времени. Для решения уравнений теплообмена необходимо задание основных тепловых свойств породы: теплопроводности, объемной теплоемкости, температуропроводности и теплового коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Температуропроводность определяется отношением теплопроводности к произведению плотности и изобарной удельной теплоемкости. Следовательно, только три из четырех параметров независимы и подлежат определению. Объемная теплоемкость – аддитивное свойство, которое не зависит от структуры породы и может быть оценено по минеральному составу породы. Также существуют рекомендации-стандарты американского сообщества по испытанию материалов (ASTM) для определения удельной теплоемкости пород и почв [ASTM D4611-08, 2008]. Однако для теплопроводности до сих пор не существует признанных международных стандартов методов измерения, хотя попытки их создать проводятся [Porov et al., 2016].

В тех случаях, когда невозможно провести непосредственное измерение тепловых свойств горных пород, используют теоретические подходы: методы теории эффективных сред [Баюк, 2011; Gary et al., 2009; Sævik et al., 2014], методы искусственных нейронных сетей [Zhang, Friedrich, 2003], подход на основе ренормгруппового преобразования [Новиков, Wojciechowski, 1999; Тертычный, 2001], правила смешений [Madden, 1976], цифровые модели [Demianov, Korobkov, 2014] 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 [Wang, Pan, 2008]. На сегодняшний день не существует ни одного надежного прибора для измерения тепловых свойств (теплопроводности,

объемной теплоемкости, температуропроводности) по стволу скважины [Freifeld et al., 2008], технологии проведения акустического каротажа наиболее совершенны и входят в набор стандартных каротажей различных компаний. Вследствие этого необходимо последовательное изучение подходов, которые могут позволить связать упругие и тепловые свойства горных пород для определения последних на основе модели физических свойств породы и соответствующих экспериментальных данных по упругим свойствам породы. 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 [Anand et al, 1973; Gegenhuber, Schoen, 2012; Vasseur et al., 1995]. Существенным этапом развития подходов для установления связи различных эффективных свойств стала разработка метода, основанного на теории эффективных сред [Баяк, 2013].

Построение модели физических свойств породы, позволяющую связать ее эффективные упругие и тепловые свойства с параметрами, характеризующими ее структуру, может быть полезно для решения и других задач. В некоторых случаях невозможно получить качественную запись акустического каротажа, например, для зон, в которых произошли размывы или вывалы участков горной породы. Непосредственный отбор керна также проблематичен для таких зон. Для восстановления эффективных свойств таких участков можно использовать математические модели физических свойств породы и искусственных композитов, изготовленных из шлама.

### **Цель работы**

Повышение достоверности определения макроскопических упругих и тепловых свойств основных типов коллекторов углеводородов в различных состояниях флюидонасыщения в условиях отсутствия возможности проведения непосредственных прямых измерений.

### **Основные задачи исследования**

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 ядра 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.

#### **Научная новизна работы**

1. Созданы единые математические параметрические модели упругих и тепловых свойств карбонатных и терригенных типов пород, учитывающие особенности их строения и позволяющие рассчитывать одни свойства через другие.
2. Получена новая формула для расчета эффективной теплопроводности микронеоднородной среды на основе метода T-матрицы.
3. Разработан и реализован алгоритм верификации моделей карбонатных и терригенных пород для упругих и тепловых свойств на основании решения задачи флюидозамещения.
4. Разработан и реализован способ одновременного определения эффективной теплопроводности и упругих свойств терригенных пород по физическим свойствам искусственных композитов, изготовленных из шлама этих пород.
5. Создан и реализован способ восстановления теплопроводности по упругим свойствам терригенных пород в условиях меняющегося напряженного состояния породы.

#### **Защищаемые положения**

1. Разработанная методика оценки эффективной теплопроводности микронеоднородных сред на основании метода T-матрицы позволяет определять эффективную теплопроводность горных пород по их составу и теплопроводности компонентов с учетом микроструктуры породы. Известный метод самосогласования является частным случаем разработанной методики.
2. Созданные единые математические параметрические модели упругих и тепловых свойств карбонатных и терригенных типов пород позволяют прогнозировать эти свойства при изменении параметров модели, среди которых пористость, свойства насыщающего флюида, свойства минеральных зерен породы, геометрия и связность порового пространства породы и другие характеристики пород.

3. Разработанная и верифицированная методика флюидозамещения позволяет определять с точностью необходимой для решения практических задач теплопроводность пород, насыщенных заданным флюидом.
4. Предложенный способ одновременного определения упругих и тепловых свойств терригенных типов пород по шламу позволяет определять с точностью необходимой для решения практических задач физические свойства этих пород;
5. Разработанный подход к оценке изменения геометрии пустотного пространства пород коллекторов при приложении нагрузки позволяет прогнозировать изменение одних физических свойств пород коллекторов по другим в аналогичных условиях напряженного состояния.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая и практическая значимость выполненных в диссертации исследований определяется возможностью использования новых научных результатов по нескольким следующим направлениям. Предлагаемая в диссертации методика одновременного определения упругих свойств и теплопроводности пород по шламу представляет актуальность в условиях бурения без выноса керна. Созданные математические параметрические модели карбонатных и терригенных типов пород для упругих и тепловых свойств могут применяться 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. Результаты расчетов параметров структуры пород, описывающих изменение относительного раскрытия элементов порового пространства математической модели песчаника при приложении одноосной нагрузки, могут быть использованы для оценки теплопроводности горных пород в аналогичных условиях. Результаты работы легли в основу одной патентной заявки [Патентная заявка N2016120852, 2016].

#### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 129 страниц текста, 49 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 99 наименований.

#### **Личный вклад**

Основные результаты работы, полученные лично диссертантом в ходе проведения исследований, включают: проведение литературного обзора методов по

теме диссертационной работы; вывод формулы для расчета эффективной теплопроводности, основанную на методе Т-матрицы; построение единых математических параметрических моделей упругих и тепловых свойств карбонатного и терригенного типов коллекторов в рамках обобщенного сингулярного приближения теории эффективных сред; реализацию этих моделей в виде программного кода на языке Fortran 90; проведение параметрических исследований моделей; активное участие в проведении измерений упругих и тепловых свойств пород, относящихся к третьей и четвертой главе данной работы, и обработке результатов экспериментов; верификацию предлагаемой методики и модели решением задачи флюидозамещения; разработку и верификацию методики, позволяющей прогнозировать изменение эффективной теплопроводности в зависимости от приложенной нагрузки по данным об изменении упругих свойств при соответствующих нагрузках; построение модели искусственного композита, изготовленного из шлама породы, и ее применение для восстановления эффективных свойств нескольких терригенных типов пород

#### **Апробация работы**

По теме диссертации автором опубликовано 10 печатных работ, из которых 3 статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации, и два расширенных тезиса, цитируемых в системе SCOPUS. Результаты работы докладывались на 2 российских и 5 международных конференциях: XI-ой международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2013), VII-ой международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле» (Москва, 2014), XVII-ой научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2015» EAGE (Геленджик, 2015), XXI-ых Губкинских чтениях «Фундаментальный базис инновационных технологий поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа и приоритетные направления развития ресурсной базы ТЭК России» (Москва, 2016), VII-ой международной геолого-геофизической конференции и выставке «Санкт-Петербург 2016. Через интеграцию геонаук — к постижению гармонии недр» (Санкт-Петербург, 2016), V-ой научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (Москва, 2016), 50<sup>th</sup> US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (Хьюстон, 2016). Также результаты неоднократно докладывались на

семинарах Московского физико-технического института (государственного университета), Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и Московского научно-исследовательского центра Шлюмберже.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Баюк И.О. за плотное сотрудничество в течение всего периода проведения данной работы, за консультации, советы и чуткое отношение, Институту физики Земли РАН и московскому научно-исследовательскому центру Шлюмберже. Отдельная благодарность Сафонову С.С., д.ф.-м.н. Попову Ю.А., к.ф.-м.н. Абашкину В.В., к.ф.-м.н. Чехонину Е.М. и к.т.н. Паршину А.В. за организацию работы, а также Попову Е.Ю. и к.т.н. Тарелко Н.Ф. за консультации и обсуждения методов измерений, использованных в данной работе, Ромушкевич Р.А. за консультации по геологии. Особую благодарность автор выражает своей жене Ялаевой К.И за личную поддержку.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи, цель и новизна исследования, раскрыта теоретическая и практическая ценность работы.

**Первая** глава представляет собой обзор исторических и современных методов математического моделирования эффективных упругих и тепловых свойств горных пород. Рассматриваются различные методы математического моделирования эффективных свойств, в том числе, 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 основные выражения, связывающие эффективные свойства пород и параметры моделей этих методов. Описаны ограничения использования методов, их преимущества и недостатки.

В этой главе предлагается оригинальный метод расчета эффективной теплопроводности породы на основе метода Т-матрицы [Zeller, Dederichs, 1973]. Горную породу можно представить в виде сплошной среды, разбитой на  $N$  семейств областей с одинаковой формой и теплопроводностью  $\lambda^k, k = 1, N$ . Согласно предлагаемым выкладкам, эффективная теплопроводность среды, для которой теплопроводность задана в виде кусочно-постоянной функции, может быть рассчитана с использованием следующих выражений

$$\begin{aligned} \lambda^{eff} &= \lambda^0 + \lambda_1 (\mathbf{I} + (\lambda_1)^{-1} \lambda_2)^{-1}, \\ \lambda_1 &\stackrel{\text{def}}{=} \sum_k \mathbf{t}^k \nu^k, \\ \lambda_2 &\stackrel{\text{def}}{=} \sum_m \sum_n \mathbf{t}^m \nu^m \int_{\Omega^{k,l}} d\mathbf{r}' \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{t}^n \nu^n. \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $k = 1, \dots, N$  – номер области, в пределах которой поле теплопроводности однородно,  $\mathbf{I}$  – единичный тензор второго ранга,  $\mathbf{G}_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – компонента второй производной функции Грина, которая зависит от формы компонент среды. Оператор  $\mathbf{t}^k$  определяется как аналог Т-матрицы и может быть рассчитан по следующей формуле

$$\mathbf{t}^k = \left( \mathbf{I} - (\lambda^k - \lambda^0) \frac{1}{|\Omega^k|} \int_{\Omega^k} d\mathbf{r} \int_{\Omega^k} d\mathbf{r}' \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \right)^{-1} (\lambda^k - \lambda^0). \quad (1.2)$$

где  $\Omega^k$  – k-ая область среды,  $|\Omega^k|$  – объем k-ой области,  $\lambda^k$  – теплопроводность k-ой области.

Показано, что частным случаем полученной формулы является формула расчета эффективной теплопроводности с помощью метода самосогласования, в котором предполагается, что за пределами зерна неоднородного материала физические свойства совпадают со свойствами эффективной среды всего материала. Формула эффективной теплопроводности в этом случае имеет вид

$$\lambda^{eff} = \langle \lambda(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')(\lambda(\mathbf{r}) - \lambda^{eff}))^{-1} \rangle \langle (\mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')(\lambda(\mathbf{r}) - \lambda^{eff}))^{-1} \rangle^{-1}. \quad (1.3)$$

В конце главы кратко рассматриваются 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.

В **параграфе 2.1** рассматриваются основные принципы методики построения обобщенных моделей физических свойств пород. Под математической моделью эффективных физических свойств породы понимают следующую триаду.

1. Модельная среда, отражающая основные черты строения породы.
2. Параметры модели, описывающие ее структуру и свойства (форма зерен, пустот, связность компонент, пористость разного вида, параметры, характеризующие физические свойства компонент).
3. Уравнения связи между физическими свойствами и параметрами модели.

В основе построения моделей физических свойств горных пород лежат два основных принципа.

1. Принцип связи различных эффективных свойств породы и единых параметров структуры ее модели.

2. Принцип построения структуры модели физических свойств породы, позволяющий учитывать основные особенности породы, с минимальным количеством параметров.

В параграфе 2.2 описывается уравнение связи тепловых и упругих свойств горных пород с параметрами ее структуры, полученное в рамках обобщенного сингулярного приближения [Шермергор, 1977], оно имеет вид

$$\mathbf{X}^{eff} = \langle \mathbf{X}(\mathbf{r}) \left( \mathbf{I} - \mathbf{g}\mathbf{X}'(\mathbf{r}) \right)^{-1} \rangle \langle \left( \mathbf{I} - \mathbf{g}\mathbf{X}'(\mathbf{r}) \right)^{-1} \rangle^{-1}, \quad (1.4)$$

где  $\mathbf{X}^{eff}$  – эффективное физическое свойство (тензор упругости, теплопроводности) среды,  $\mathbf{X}(\mathbf{r})$  – соответствующее локальное свойство образца,  $\mathbf{X}'(\mathbf{r}) = \mathbf{X}(\mathbf{r}) - \mathbf{X}^c$ ,  $\mathbf{X}^c$  – соответствующее свойство тела сравнения, которое учитывает связность элементов порового пространства и так называемые контактные эффекты,  $\mathbf{g}$  – сингулярная часть второй производной тензора Грина, которая зависит от геометрии элементов пустотного пространства среды и свойств тела сравнения. Согласно этой формуле, физические свойства среды зависят от структуры породы и связности элементов порового пространства.

В параграфе 2.3 рассматриваются основные этапы построения математических моделей эффективных физических свойств пород, основанных на едином описании их микроструктуры.

1. Определение характерного масштаба породы.
2. Предварительный геологический анализ породы.
3. Выделение минимального числа параметров модели, определяющих макроскопические физические свойства коллектора. Определение начальных значений и границ диапазона изменения параметров модели на разных масштабах.
4. В случае необходимости проведение корректировки параметров математической модели на основании сравнения расчетных значений (скоростей продольных и поперечных волн, теплопроводности и др.) с соответствующими экспериментальными значениями.
5. Проведение параметрического исследования модели, то есть определение чувствительности модели к изменению ее параметров.

В параграфах 2.4-2.6 предложенные принципы применяются для моделирования физических свойств карбонатных и терригенных типов пород. Для этого были рассмотрены две коллекции карбонатного типа пород, состоящих из 102 и 55 образцов соответственно, и коллекция терригенного типа пород, состоящая из 91

образца. Строятся две модели физических свойств коллекторов: одна модель для карбонатного типа пород, вторая модель для терригенного типа пород.

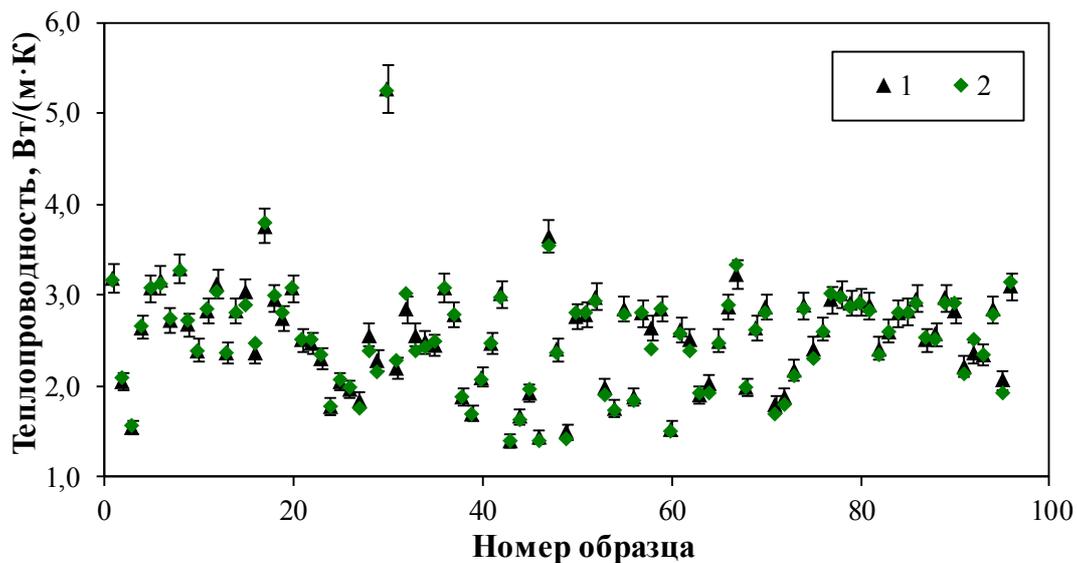
Для верификации предлагаемых моделей решается задача флюидозамещения для теплопроводности. Предлагается алгоритм решения этой задачи, который состоит из трех этапов.

1 этап. Измерение теплопроводности образца, насыщенного последовательно двумя флюидами.

2 этап. Решение обратной задачи методом деформируемого многогранника для определения параметров внутренней структуры и теплопроводности матрицы.

3 этап. Расчет эффективной теплопроводности образца, насыщенного третьим флюидом, по найденным параметрам и известной теплопроводности флюида.

Приводятся результаты сравнения расчетной и экспериментальной эффективной теплопроводности образцов, насыщенных моделью пластовой воды, нефти и воздуха (рис. 1).



**Рис. 1.** Сравнение расчетной (2) и измеренной (1) теплопроводности нефтенасыщенных образцов карбонатного типа коллектора коллекции 1. Вертикальные интервалы показывают вариации теплопроводности в пределах  $\pm 5\%$  от измеренного значения

В дополнение к этому показано 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

сопоставимо с ошибкой метода измерения теплопроводности (метода оптического сканирования).

В **третьей** главе рассматривается вопрос об установлении связи упругих свойств и теплопроводности при атмосферных условиях, а также в условиях напряженного состояния на примере песчаника Бентхаймер.

В **параграфе 3.1** дано общее геологическое описание песчаника Бентхаймер.

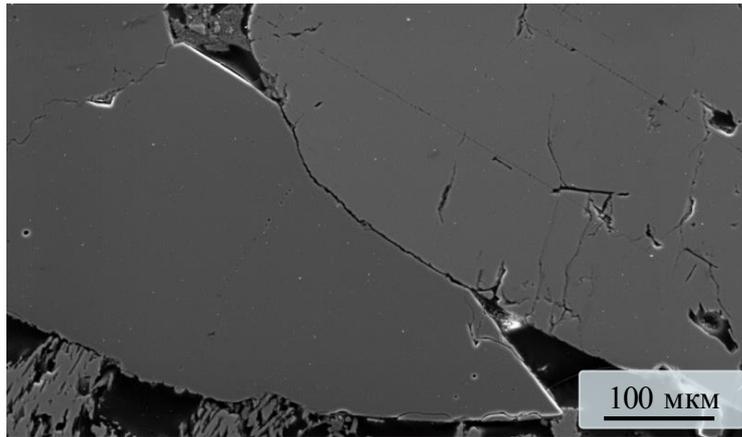
В **параграфе 3.2** приведены результаты измерений физических свойств на 20 образцах песчаника Бентхаймер при комнатной температуре и атмосферном давлении. Автор принимал активное участие в получении, обработке и анализе экспериментальных данных: пористости, проницаемости, плотности, теплопроводности сухих и образцов, насыщенных моделью пластовой воды, а также упругих динамических характеристик. Приведены описания всех методов, использованных для измерений, и условий проведения этих измерений.

В **параграфе 3.3** приведены результаты измерений физических свойств песчаника Бентхаймер в условиях приложенной осевой нагрузки. Измерение зависимости скоростей продольных и поперечных волн было произведено в стандартной ячейке кернодержателя. Для измерения теплопроводности была разработана специальная ячейка, дополненная линейным источником постоянного тепла с постоянной мощностью. Описаны детали проведения измерений.

В **параграфе 3.4** представлены результаты моделирования физических свойств песчаника Бентхаймер. Приведены результаты литолого-петрографического анализа:

- обломочный материал, представленный в песчанике, имеет квазиэллипсоидальную форму с фиксированным аспектным отношением;
- аспектное отношение обломочного материала составляет 0,6; это значение было рассчитано с помощью программы AxioVision 4.8.1 по фотографиям шлифов;
- форма элементов порового пространства имеет унимодальное распределение согласно анализу фотографий шлифов.

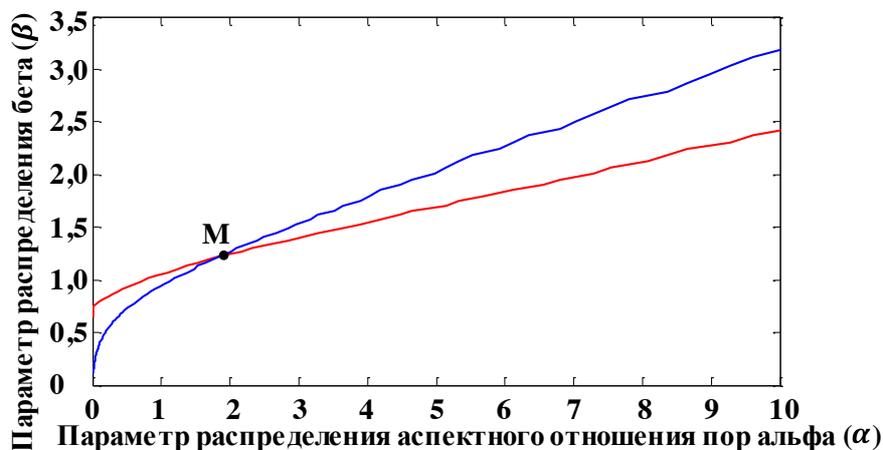
С помощью сканирующего электронного микроскопа показано, что структура пустотного пространства имеет множество межзерновых каналов (рис. 2). Для моделирования физических свойств терригенного типа коллектора предлагается использовать модель, которая была использована для коллекции терригенного типа пород во второй главе.



**Рис. 2.** Изображение контакта между кварцевыми зёрнами песчаника Бентхаймер, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа в режиме детектирования вторичных электронов

В параграфе 3.5 приведены результаты параметрических исследований данной модели эффективных свойств с учетом полученных экспериментальных данных. Показано, что области решений обратной задачи по расчету параметров моделей упругих свойств породы и теплопроводности отличаются.

Сопоставление областей эквивалентных решений (решение с наименьшим среднеквадратичным отклонением расчетных данных от экспериментальных) для первой и второй модели позволяет определить область значений параметров  $\alpha, \beta$ , описывающих распределение раскрытия элементов пустотного пространства, в которой следует искать решение задачи. На рисунке 3 приведены эквивалентные решения обратной задачи модели тепловых и упругих свойств песчаника Бентхаймер. Определенная область значений составила для  $\alpha$  от 1,7 до 2,1, а для  $\beta$  от 1,1 до 1,4 в окрестности точки пересечения решений М на графике.



**Рис. 3.** Оптимальные решения обратной задачи (минимальное отклонение расчетных и измеренных свойств) для моделей тепловых (синий цвет) и упругих (красный цвет) свойств песчаника Бентхаймер для разных параметров структуры породы  $\alpha$  и  $\beta$ . Точка М – точка пересечения этих решений

В параграфе 3.6 представлены результаты решения прямой задачи – задачи определения теплопроводности по данным о скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн породы в условиях комнатной температуры и атмосферного давления. Приведены результаты сравнения расчетных и измеренных значений скоростей продольных и поперечных волн (рис. 4а, б) и теплопроводности (рис. 4в).

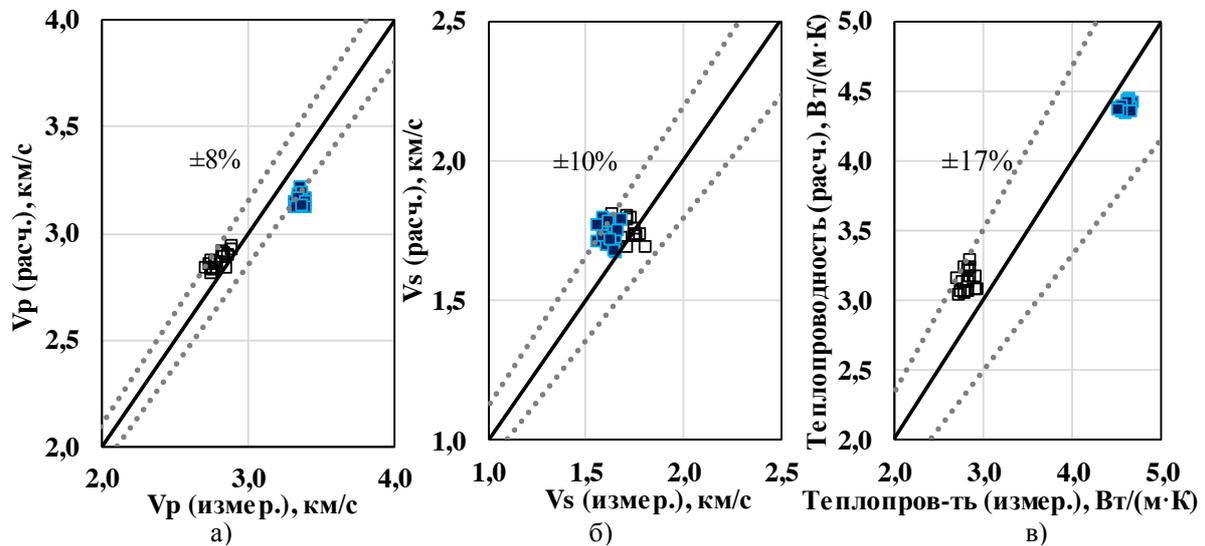


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений теплопроводности (в) сухих (черные квадраты) и водонасыщенных (синие квадраты) образцов песчаника Бентхаймер по данным о скоростях упругих волн (а,б)

А также обратной задачи – задачи определения скоростей  $V_p$  и  $V_s$  по данным о теплопроводности породы в аналогичных условиях. Результаты представлены на соответствующих рисунках (рис. 5а, б, в).

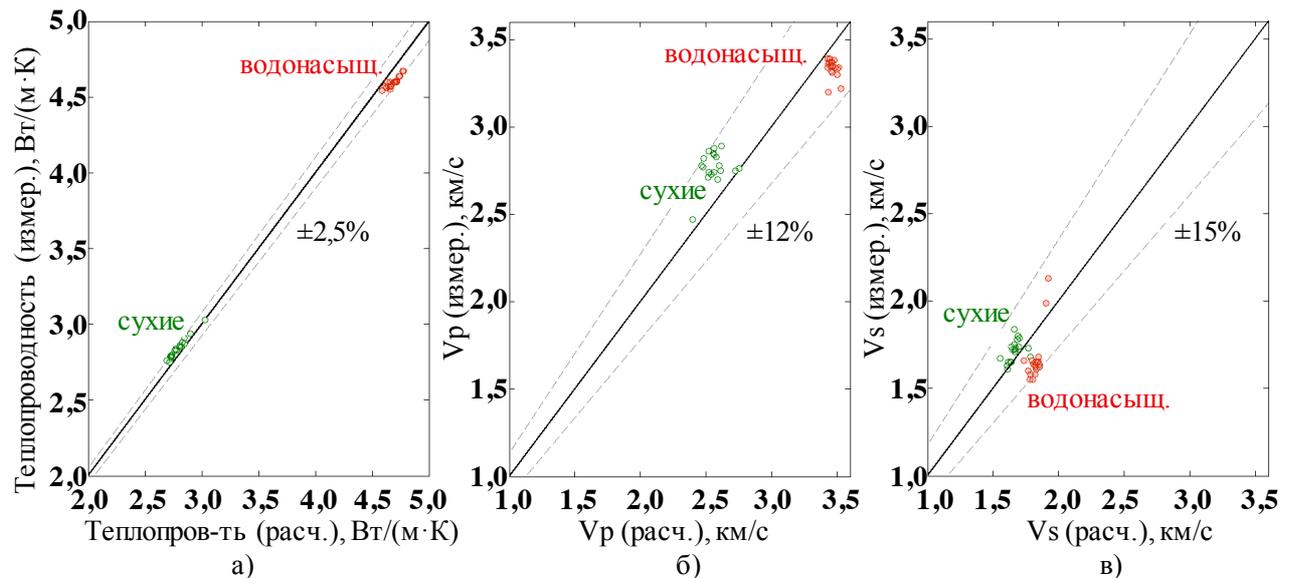


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных значений (б) скоростей продольных упругих волн и (в) скоростей поперечных упругих волн для сухих и водонасыщенных образцов песчаника Бентхаймер при комнатной температуре и атмосферном давлении по данным о теплопроводности (а)

В параграфе 3.7 приведены результаты решения задачи прогноза зависимости теплопроводности от приложенной осевой нагрузки по соответствующим данным об упругих свойствах (рис. 6).

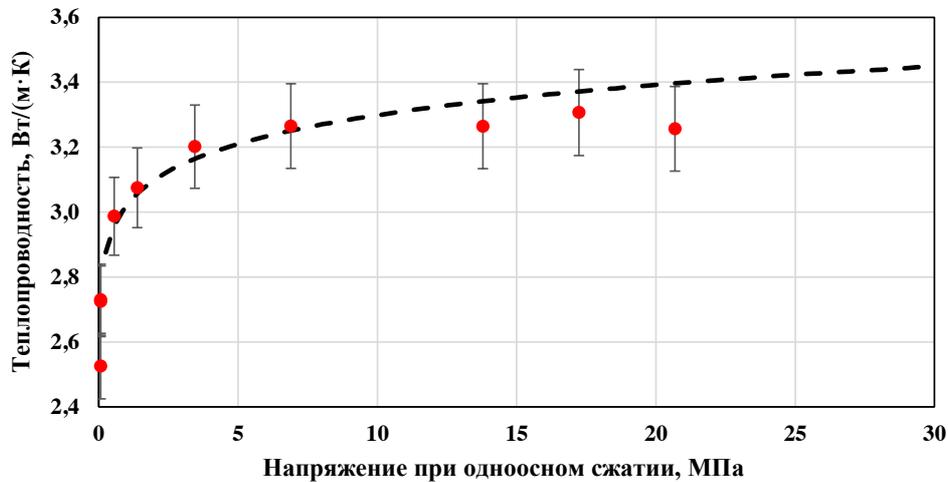


Рис. 6. Сравнение зависимости расчетной (пунктирная линия) и экспериментальной (точки) теплопроводности песчаника Бентхаймер от приложенной осевой нагрузки

Построенная математическая модель упругих свойств песчаника Бентхаймер используется для количественной оценки изменения параметров, описывающих внутреннюю структуру исследуемого песчаника, в зависимости от приложенной осевой нагрузки (рис. 7). Затем эти данные используются для расчета теплопроводности породы с помощью математической модели тепловых свойств песчаника Бентхаймер.

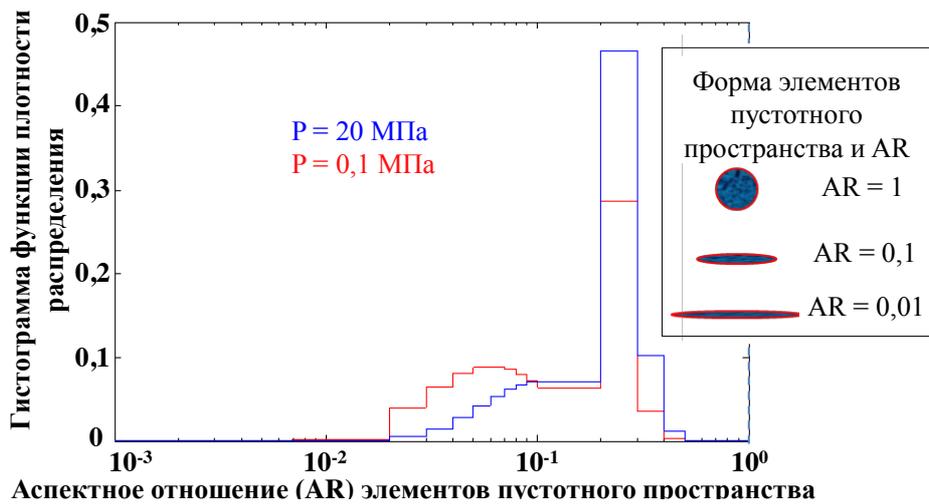


Рис. 7. Сравнение структуры порового пространства (распределения аспектного отношения элементов порового пространства) при различных осевых нагрузках 0,1 МПа и 20 МПа

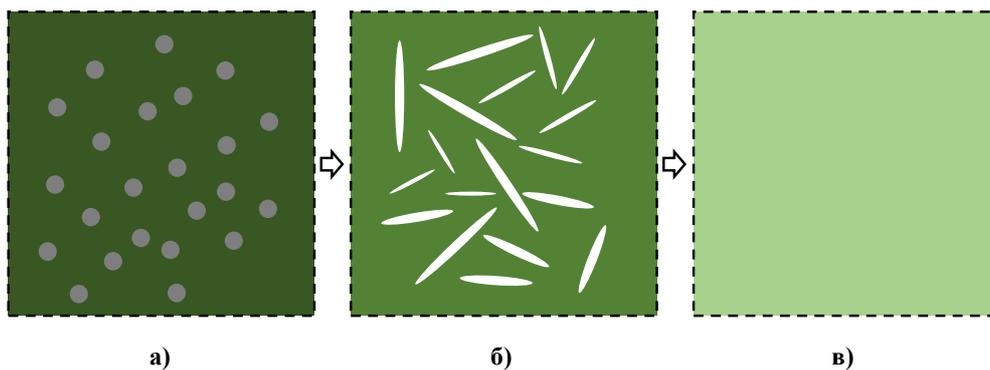
В **четвертой** главе решается задача по восстановлению упругих и тепловых свойств горных пород по данным о физических свойствах композитов, изготовленных из их фрагментов (шлама).

В **параграфе 4.1** приведено описание способа изготовления искусственных образцов, которые представляют собой композит – спрессованную смесь мелкозернистого парафина и фрагментов породы (шлама). Приведены результаты измерений упругих свойств и теплопроводности искусственных образцов.

В **параграфе 4.2** представлены результаты моделирования тепловых и упругих свойств композита на основе метода теории эффективных сред в обобщенном сингулярном приближении. Модель позволяет связать упругие и тепловые свойства этой среды через параметры, описывающие структуру искусственных композитов. С использованием полученных экспериментальных данных на основе построенной модели предлагается методика восстановления упругих и тепловых свойств горных пород по данным о физических свойствах композитов.

Предполагается, что моделируемая среда состоит из трех компонент: парафин, частицы породы и пустоты, заполненные воздухом. Моделирование производится поэтапно и состоит из двух стадий (рис. 8).

На первой стадии определяются свойства среды, которая не содержит воздушные прослойки (рис. 8а). Частицы породы представляют собой хаотические включения, а парафин является включающей средой. На этой стадии для расчета физических свойств была использована модель нижней границы Хашина-Штрикмана, так как воск имеет более низкие упругие модули по сравнению с частицами породы. При этом предполагается, что форма включений породы (шлама) имеет сферическую форму. На второй стадии в среду, эффективные свойства которой совпадают со свойствами среды, определенными на первой стадии, добавляются воздушные прослойки (рис. 8б). Они возникают на границе между включениями породы и спрессованного парафина и ориентированы в образцах композитного материала хаотично, без какого-либо выделенного направления. Эффективные свойства такой среды рассчитываются методом самосогласования. В результате получены эффективные свойства среды, которая моделирует композит.



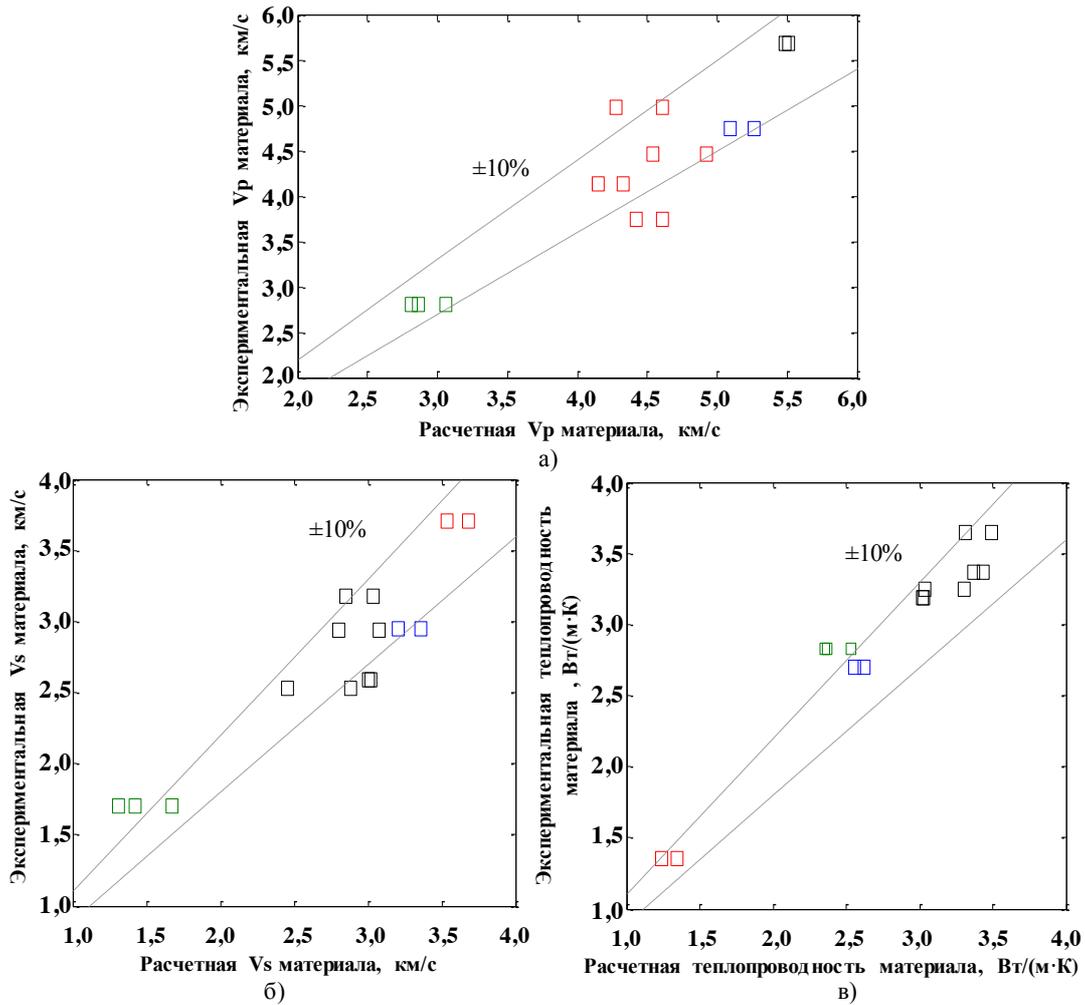
**Рис. 8.** Стадии расчета математической модели искусственных образцов: а) воск и частицы породы, б) добавление воздушных прослоек, в) эффективная среда. Темно-зеленым цветом показан воск, серым – частицы породы, белым – воздушные прослойки

В этом параграфе приведены также результаты параметрических исследований предлагаемой модели. Определяются параметры, к которым наиболее чувствительны эффективные физические свойства среды (аспектное отношение воздушных прослоек). Показано, что при изменении аспектного отношения минеральных зерен в пределах от 0,5 до 1,0, свойства среды изменяются не более, чем на 0,6% для  $V_p$  и 1,2% для  $V_s$ .

В параграфе 4.3 приведено детальное описание решения обратной задачи по определению параметров модели, характеризующих структуру и свойства искусственных композитов. Всего в модели выделены пять неизвестных параметров: скорости продольных и поперечных волн породы, теплопроводность породы, объем воздушных прослоек и относительная степень раскрытия (аспектное отношение) воздушных прослоек.

Решением обратной задачи без дополнительных ограничений на параметры является область, значительно превышающая погрешность измерений эффективных свойств материалов. Предложен способ получения более узкой области решения обратной задачи.

Также в этом параграфе приведено сравнение экспериментальных и расчетных значений эффективных скоростей упругих продольных (рис. 9а), поперечных (рис. 9б) волн и теплопроводности породы (рис. 9в). Среднее отклонение для скоростей продольных и поперечных волн и теплопроводности не превосходит 10% при допущении о 5%-ой погрешности экспериментальных данных.



**Рис. 9.** Сравнение экспериментальных и расчетных значений скоростей продольных волн (а) и поперечных (б) волн и теплопроводности (в) породы

В **Приложениях А** и **Б** приведены подробные выводы некоторых выражений, использованных при выводе формулы расчета эффективной теплопроводности, основанной на методе Т-матрицы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В первой главе рассмотрены и сгруппированы наиболее распространенные теоретические подходы для расчета эффективных физических свойств пород. Описаны сильные и слабые стороны каждой из групп. Рассмотрены методы измерения теплопроводности. Получена формула для расчета эффективной теплопроводности микронеоднородной среды на основе метода T-матрицы. Показано, что формула известного метода самосогласования теории эффективных сред является частным случаем этой формулы.

2. Во второй главе описаны основные принципы методики установления связи тепловых и упругих свойств горных пород. Детально описаны этапы комплексного анализа пород и построения модели эффективной среды. Предложенные принципы были использованы для построения моделей физических свойств карбонатных и терригенных типов пород.

3. Предложен алгоритм решения задачи флюидозамещения для теплопроводности. Для реализации этого алгоритма использованы модели физических свойств карбонатных и терригенных типов пород, построенные в главе 2. Проведено сравнение результатов прогноза теплопроводности, полученных методом обобщенного сингулярного приближения теории эффективных сред, с другими методами.

4. Проведено комплексное исследование физических свойств и структуры песчаника Бентхаймер. Полученные экспериментальные данные о физических свойствах песчаника Бентхаймер и его структуре дали возможность использовать для моделирования его физических свойств модель, построенную в главе 2 для терригенного типа коллектора. На основании построенной модели установлена связь между теплопроводностью породы и скоростями продольных и поперечных волн. Построенная модель успешно использована для прогноза теплопроводности песчаника Бентхаймер по данным об упругих свойствах породы и наоборот, - для прогноза упругих свойств по данным о теплопроводности этой породы.

5. Построенная параметрическая математическая модель физических свойств песчаника Бентхаймер использована для количественной оценки изменения параметров структуры модели в зависимости от приложенной осевой нагрузки. Это

позволило определить зависимость эффективной теплопроводности от приложенной осевой нагрузки по соответствующим данным о ее упругих свойствах.

6. Предложена методика по определению эффективных упругих свойств и теплопроводности горных пород по соответствующим свойствам композита, изготовленного из фрагментов этой породы (шлама). Описан способ изготовления образцов композитного материала для измерений соответствующих физических свойств. Предложена двухстадийная математическая модель физических свойств искусственного образца на основе теории эффективных сред в приближении обобщенного сингулярного приближения. Проведен параметрический анализ модели, позволяющий установить параметры, к которым эффективные физические свойства наиболее чувствительные. На основании предложенной модели проведены расчеты эффективных свойств породы по данным о физических свойствах, измеренных на образцах композитного материала.

### **Список публикаций по теме диссертации из перечня рецензируемых научных изданий ВАК**

1. Ялаев Т.Р., Баюк И.О., Горобцов Д.Н., Попов Е.Ю. Экспериментальный анализ применимости современных подходов к теоретическому моделированию теплопроводности осадочных пород // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2013. Т. 2. С. 63–68.

2. Ялаев Т.Р., Баюк И.О. Особенности и критерии использования теории эффективных сред для моделирования эффективной теплопроводности карбонатных и терригенных пород // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2016. Т. 2. С. 35–41.

3. Ялаев Т.Р., Баюк И.О., Тарелко Н.Ф., Абашкин В.В. Связь тепловых и упругих свойств песчаника // Технологии сейсморазведки. 2016. Т. 2. С. 76–82.

### **Прочие публикации**

1. Ялаев Т.Р., Баюк И.О., Горобцов Д.Н., Попов Е.Ю. Экспериментальный анализ надежности современных подходов к теоретическому моделированию теплопроводности осадочных пород // Доклады. XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле», 09-12 апреля 2013, Москва, Россия. Т. 3. 2013а. С. 396–398.

2. Ялаев Т.Р., Баюк И.О., Горобцов Д.Н., Попов Е.Ю. Математическое моделирование теплопроводности терригенных пород с учетом особенностей их структуры // Материалы конференции. VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле», 15-17 апреля 2014, Москва, Россия. 2014. С. 206–207.

3. Ялаев Т.Р. Прогноз теплопроводности терригенной породы в условиях напряженного состояния по данным об ее упругих свойствах // Тезисы докладов. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН тезисы докладов и программа конференции. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Москва. 2016. С. 78.

4. Ялаев Т.Р., Баюк И.О. Особенности и критерии использования теории эффективных сред для моделирования эффективной теплопроводности карбонатных и терригенных пород // XXI Губкинские чтения «Фундаментальный базис

инновационных технологий поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа и приоритетные направления развития ресурсной базы ТЭК России» Тезисы докладов. РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. 2016b. С. 154–158.

5. Yalaev T.R. et al. Application of effective medium theory to reconstruction of elasticity tensor of bentheimer sandstone // Proceedings of the 17th Scientific-Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development «Geomodel 2015» held in Gelendzhik 12-17 September 2015. P. 310–314.

6. Yalaev T.R. et al. Connection of elastic and thermal properties of Bentheimer sandstone using effective medium theory (rock physics) // ARMA-2016-128. 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 26-29 June, Houston, Texas, 2016. P. 1–7.

7. Yalaev T.R., Bayuk I.O., Popov E.Y. Fluid substitution problem for thermal conductivity of hydrocarbon reservoirs based on rock physics methods // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition «Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences», Saint Petersburg, Russia, 11-14 April 2016, 2016. P. 11–14.

Подписано в печать: 30.06.2017 г

Заказ № 12032 Тираж - 120 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(977) 518-13-77, (499) 788-78-56

[www.autoreferat.ru](http://www.autoreferat.ru) [riso@mail.ru](mailto:riso@mail.ru)