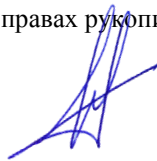


На правах рукописи



Попов Евгений Юрьевич

**РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕПЛОВОЙ
ПЕТРОФИЗИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ С
ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ И НЕТРАДИЦИОННЫМИ
ЗАПАСАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические
методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» в Центре по добыче углеводородов

Научный руководитель: **Баяк 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

Официальные оппоненты: **Эмиров Субханверди Нурмагомедович**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория теплофизики геотермальных систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук

Кременецкий Михаил Израилевич
доктор технических наук, профессор кафедры «Геофизических информационных систем», факультет Геологии и геофизики нефти и газа, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.**

Защита диссертации состоится в 14 часов 6 февраля 2020 года на заседании диссертационного совета Д.002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 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 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

 В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Рост требований к объему и качеству данных о тепловых свойствах пород-коллекторов и вмещающих пород обусловлен развитием тепловых методов добычи углеводородов бассейнового моделирования, разнообразием типов пород, исследуемых в процессе изучения геологического строения месторождений углеводородов. Несмотря на важность исследований пород баженовской свиты и доманиковой формации, до последнего времени оставались малоизученными такие их базовые физические свойства, как теплопроводность, объемная теплоемкость, степень тепловой анизотропии, вариации этих свойств в масштабах месторождений и образцов пород. Актуальными являются задачи улучшения качества данных о тепловых свойствах пород для повышения надежности оценок теплового потока, интерпретации результатов термометрии в скважинах. Решение этих задач требует развития экспериментальной базы тепловой петрофизики.

К важным задачам по повышению эффективности методов тепловой петрофизики относятся: переход к регистрации детального распределения комплекса тепловых свойств вдоль скважин, совершенствование аппаратурно-методической базы для неразрушающих измерений тепловых свойств на керне и стандартных образцах пород, создание новых возможностей для определения тепловых свойств минеральной матрицы пород, информация о которых необходима при бассейновом моделировании и термогидродинамическом моделировании тепловых методов добычи тяжелых нефтей.

В условиях отсутствия эффективных решений для измерений тепловых свойств в скважинах актуальной стала разработка метода неразрушающего непрерывного профилирования тепловых свойств на всем полноразмерном керне скважин, что особенно важно при изучении пластов высоконеоднородных и анизотропных пород небольшой мощности, характерных для баженовской свиты и доманиковой формации. Такой метод, при установлении корреляционных связей тепловых свойств с другими свойствами пород, повысит качество исследований других свойств пород, таких как пористость, содержание органического вещества, состав порового флюида, скорости упругих волн, геомеханические свойства и др.

Цель работы

Повышение надежности результатов решения таких важных задач, как термогидродинамическое моделирование тепловых методов добычи углеводородов, бассейновое моделирование, петрофизическое обеспечение работ по поиску, разведке и разработке месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными ресурсами углеводородов путем повышения качества экспериментальных данных о свойствах пород.

Основные задачи работы

1. Развитие аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики на основе метода оптического сканирования путем усовершенствования режима

измерений, подходов к подготовке образцов пород, разработки новых приборов, расширяющих области применения методов тепловой петрофизики.

2. Разработка метода непрерывного теплофизического профилирования керна скважин и создание возможности для комбинирования его с другими методами поточного профилирования свойств керна.

3. Разработка подходов к получению данных об общем содержании органического вещества, пористости, анизотропии и ряде других свойств пород месторождений углеводородов на основе применения усовершенствованной аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики и комплексирования теплофизических данных с данными ГИС.

4. Применение усовершенствованной аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики для теплофизических исследований месторождений трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов углеводородов.

Научная новизна работы

1. Установлены параметры режима измерений тепловых свойств пород-коллекторов методом оптического сканирования и разработаны способы подготовки образцов пород к измерениям, значительно уменьшающие тепловое и механическое воздействие на образцы керна, обеспечивающие их сохранность на стадиях подготовки и проведения измерений, не снижающие качество измерений и повышающие их производительность.

2. Разработаны автономный лазерный модуль оптического сканирования для комплексирования высокоразрешающего непрерывного теплофизического профилирования полноразмерного керна с механическим скретч-тестированием и профильными гамма-спектрометрическими исследованиями полноразмерного керна и мобильная лазерная установка оптического сканирования для измерений тепловых свойств пород на стандартных образцах пород, мелких фрагментах керна и синтетических образцах, используемых при исследованиях шлама.

3. Разработан метод изучения трещиноватости пород путем анализа вариаций главных значений тензора теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии при сочетании измерений на сухих и флюидонасыщенных образцах.

4. Разработан метод непрерывного бесконтактного высокоразрешающего теплофизического профилирования керна скважин и предложены подходы к обработке результатов его применения в совокупности с данными ГИС.

5. Разработан метод определения общего содержания органического вещества в породах баженовской свиты и доманиковой формации и регистрации его детальных пространственных вариаций вдоль скважин по результатам профилирования теплопроводности на керне.

6. Разработаны методы экспериментального определения тепловых свойств минеральной матрицы пород при сочетании исследований стандартных образцов пород, непрерывного профилирования тепловых свойств на керне и материалов ГИС.

7. По результатам обширных экспериментальных исследований с применением предложенных параметров измерений и новой аппаратурно-методической базы получены представительные данные о тепловых свойствах пород баженовской свиты и доманиковой формации, включая степень анизотропии и разномасштабной неоднородности пород.

Новизна результатов автора подтверждается, в частности, двумя патентами на изобретения.

Защищаемые научные положения

1. Эллиптическая форма области нагрева, повышение скорости сканирования, и разработанные способы подготовки образцов пород к измерениям тепловых свойств обеспечивают снижение температуры нагрева образцов пород, повышение скорости измерений и сохранность образцов без ухудшения метрологических характеристик измерений методом оптического сканирования.

2. Лазерные приборы оптического сканирования обеспечивают комбинирование теплофизического профилирования с поточным профилированием свойств керна при помощи спектрального гамма-каротажа на керне и скретч-тестирования, измерения на стандартных образцах пород, а также позволяют характеризовать ориентацию неизометричного пустотного пространства и осуществлять систематический контроль изменений свойств образцов в процессе лабораторных петрофизических исследований.

3. Метод непрерывного высокоразрешающего профилирования тепловых свойств керна позволяет регистрировать распределение общего содержания органического вещества пород баженовской свиты и доманиковой формации вдоль скважин с высокой пространственной разрешающей способностью, а также определять вариации теплопроводности минеральной матрицы вдоль скважин для традиционных коллекторов.

4. Породы баженовской свиты и доманиковой формации обладают выраженной разномасштабной неоднородностью тепловых свойств. Коэффициент тепловой анизотропии этих пород изменяется в широких пределах как с глубиной, так и для различных образцов.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- усовершенствование метода оптического сканирования путем разработки новых режимов измерений и способов подготовки образцов пород к измерениям;
- участие в разработке автономного лазерного модуля оптического сканирования;
- разработка мобильного лазерного прибора оптического сканирования;
- разработка и внедрение метода непрерывного теплофизического профилирования керна скважин;
- проведение международного метрологического тестирования приборов оптического сканирования с традиционными средствами для измерений теплопроводности пород;

- расширение области применения тепловой петрофизики для анализа ориентации неизометричного пустотного пространства, определения тепловых свойств минеральной матрицы пород, общего содержания органического вещества, анализа вариаций вдоль скважин пористости, плотности, скоростей упругих волн и ряда других свойств пород в сочетании с данными ГИС;

- применение новых разработок для контроля изменений свойств образцов в процессе лабораторных петрофизических исследований;

- организация и участие в теплофизических исследованиях пород месторождений углеводородов на стандартных образцах и полноразмерном керне при помощи разработанной аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики;

- участие в обработке, анализе и интерпретации результатов измерений комплекса тепловых свойств пород нефтяных месторождений.

Практическая ценность работы заключается в повышении эффективности методов тепловой петрофизики за счет повышения качества и объема информации о тепловых свойствах пород, установления новых связей тепловых свойств с другими свойствами пород, создания условий для формирования представительных баз данных о тепловых свойствах пород месторождений углеводородов для термогидродинамического моделирования резервуаров тяжелых нефтей при тепловых методах добычи и моделирования осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем. В период 2015-2019 гг. защищаемые разработки применены для изучения 30 месторождений, 13875 образцов керна для 44 скважин, вскрывших породы баженовской свиты, доманиковой формации и пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения тяжелой нефти. Результаты применения разработок автора использованы нефтяными компаниями РФ и рядом других организаций в 2015-2019 гг. для изучения месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов.

Реализация и внедрение результатов исследований

Описанные в диссертации аппаратурно-методические разработки автора применяются в Центре добычи углеводородов Сколковского института добычи углеводородов и явились основой работ по тепловой петрофизике, выполненных Центром по договорам с организациями ООО «Газпромнефть НТЦ», Филиалы ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермьНИПИнефть», «ПечорНИПИнефть», «КогалымНИПИнефть», ООО "Тюменский нефтяной научный центр", ООО «СамараНИПИнефть», ООО «НОВАТЭК» и для АО «НПЦ «Недра».

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на следующих научных форумах: International conference “Heat Flow and the Structure of the Lithosphere”, Trest, Czech Republic, 1996; Геотермическая конференция стран СНГ «Тепловое поле Земли и методы его изучения», Москва, 1997 г.; 14-я, 16-я, 17-я, 18-я, 19-я, 20-я Научно-практические конференции EAGE «Геомодель» (Геленджик, 2013-2018); Conference of Society of Petroleum Engineers - SPE Heavy Oil Conference, Calgary,

Canada, 2013; 47th US Rock Mechanics. Geomechanics ARMA Symposium, USA, 2013; V World Heavy Oil Congress, New Orleans, USA, March 2014; International Petroleum Technology Conference IPTC-8, Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 December 2014; 21st World Petroleum Congress, Moscow, 2014; VIII Всероссийское литологическое совещание «Эволюция осадочных процессов в истории Земли», Москва, 2015; ISRM International Symposium EUROCK-2016, Cappadocia, Turkey, 2016; XXI Научно-практическая конференция «Новые ГИС технологии для нефтегазовых компаний», Уфа, 2016; конференция SPE «Разработка месторождений с карбонатными отложениями», Москва, 2017; совместные научно-практические семинары EAGE/SPE «Наука о сланцах: проблемы разведки и разработки», Москва, 2017 и 2019; Международный семинар ThEOR-2018, Ченгду, КНР, 2018 г.

Публикации

Результаты работы автора отражены в подготовленных им лично или с его участием в 10 отечественных научных статьях в журналах из списка ВАК, 4 статьях в зарубежных журналах, индексируемых в базах Web of Science и SCOPUS, 7 расширенных тезисах докладов в сборниках трудов конференций EAGE, ARMA и ISRM, индексируемых в базе SCOPUS), 2 патентах РФ, в разделе монографии.

Одна статья опубликована при единоличном авторстве, в 12 статьях и одном патенте автор работы является первым автором.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 256 страниц текста, 102 рисунка, 18 таблиц и библиографию из 184 наименований.

Благодарности

Автор глубоко благодарен научному руководителю д.ф.-м.н И.О. Баяку за большую помощь в работе и подготовке диссертации. Автор выражает искреннюю признательность директору Центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий к.х.н. М.Ю. Спасенных и профессору д.ф.-м.н. Ю.А. Попову за помощь в постановке задач и проведении исследований, геологу Центра Р.А. Ромушкевич за геологический анализ коллекций, сотрудникам центра к.т.н. Е.М. Чехонину, к.г.-м.н. Н.Н. Богданович, к.г.-м.н. Е.В. Козловой, к.ф.-м.н. А.О. Гончарову и инж. А.П. Лазаренко за помощь в работе. Автор также считает своим долгом выразить благодарность профессору Сколтеха Д.В. Писаренко, к.ф.-м.н., С.С. Сафонову и к.т.н. А.В. Паршину за поддержку при организации исследований в период 2012-2015 гг. Автор благодарен М.И. Щербакову за конструкторскую помощь при разработке одного из лазерных приборов оптического сканирования. Быстрое внедрение разработок автора в нефтяную геофизику было бы невозможно без поддержки Д.Е. Заграновской (ООО «Газпромнефть НТЦ»), к.т.н. В.П. Стенина, к.г.-м.н. И.П. Гурбатовой (ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»), профессора МГУ д.г.-м.н. Г.А. Калмыкова, которым автор выражает благодарность.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность и цель настоящей диссертационной работы. Сформулированы задачи, защищаемые положения, отражены новизна и практическая значимость исследования. Представлено краткое обоснование необходимости решения сформулированных задач.

Первая глава посвящена литературному обзору современного состояния аппаратно-методической базы тепловой петрофизики, роли экспериментальных работ по тепловой петрофизики при поисках, разведке и разработке месторождений углеводородов и современных тенденциях в этой области науки. Отмечается вклад в развитие нефтяной тепловой петрофизики, который внесли отечественные и зарубежные исследователи Бабаев В.В., Баяк И.О., Вертоградский В.А., Дучков А.Д., Купцов С.М., Липаев А.А., Попов Ю.А., Соколова Л.С., Эмиров С.М., Коростелев В.М., Яковлев Б.А., Ялаев Т.Р., Blackwell D., Brigaud F., Somerton W. и др. Показано, что актуальным является совершенствование аппаратно-методической базы для экспериментальных исследований тепловых свойств пород. Это связано как с расширением круга задач, решение которых требует надежных данных о тепловых свойствах пород, так и с недостатками традиционной аппаратно-методической базы, которая не удовлетворяет возросшим требованиям с учетом необходимости массовых, метрологически обоснованных измерений теплопроводности, объемной теплоемкости, оценки степени тепловой анизотропии и характеристики разномасштабной неоднородности пород. Особенно актуальными становятся работы по получению представительной информации о тепловых свойствах пород нефтематеринских пород баженовской свиты и доманиковой формации и пород месторождений тяжелой нефти, что связано с необходимостью повышения надежности и оптимизации тепловых методов разработки.

В работе описаны результаты по тестированию (сравнению) около 20 приборов ведущих геотермических лабораторий мира и приборов оптического сканирования на сертифицированных образцовых мерах теплопроводности и коллекциях пород, выполненному лично автором, совместно с отечественными и зарубежными экспериментаторами. Результаты тестирования показали наличие серьезных проблем у традиционных средств, объясняемых отсутствием реальных возможностей определять одновременно комплекс тепловых свойств пород-коллекторов, степень их тепловой анизотропии, учитывать неоднородность пород, проводить измерения без разрушения и механической обработки керна и стандартных образцов, изучать слабоконсолидированные породы, избегать серьезного влияния теплового контакта образцов пород с элементами приборов на результаты измерений. Сделан вывод о том, что для развития экспериментальной базы тепловой петрофизики важную роль должно играть совершенствование метода и аппаратуры оптического сканирования применительно к исследованиям полноразмерного керна и стандартных образцов пород. Показаны актуальность работ по созданию метода непрерывного профилирования тепловых свойств

полноразмерного керна, необходимость создания аппаратуры оптического сканирования, способной обеспечить поточное теплофизическое профилирование в комплексе с другими методами профилирования керна, осуществлять массовые измерения комплекса тепловых свойств на стандартных образцах пород, мелких фрагментах керна и синтетических образцах, приготавливаемых при измерениях тепловых свойств на шламе и неконсолидированных породах.

Во **второй** главе работы приведены результаты исследований, направленных на развитие теоретических и экспериментальных основ метода оптического сканирования. Описаны решения по исключению влияния вариаций оптических характеристик образцов пород на результаты измерений тепловых свойств. Одно из решений предусматривает разбиение изучаемой коллекции образцов пород на группы, для каждой из которых поверхность образцов характеризуется стабильными оптическими характеристиками. В таком случае при измерениях без покрытия действительная и измеренная теплопроводность (соответственно λ и $\lambda_{изм}$) связаны соотношением

$$\lambda = \lambda_{измеренное} \cdot \frac{\varepsilon_{обр} \rho_{обр}}{\varepsilon_{эт} \rho_{эт}}, \quad (1)$$

где $\rho_{обр}$ и $\rho_{эт}$, $\varepsilon_{обр}$ и $\varepsilon_{эт}$ – соответственно коэффициенты поглощения и излучения поверхности образца породы и эталонного образца тепловых свойств. Предложен и успешно применен на 1074 образцах пород баженовской свиты способ определения отношения $(\varepsilon_{обр} \rho_{обр})/(\varepsilon_{эт} \rho_{эт})$ для каждой выделенной группы образцов путем измерений теплопроводности на нескольких характерных образцах пород каждой группы с оптическим покрытием и без него, что позволяет далее проводить измерения теплопроводности без какой-либо обработки поверхности образцов (патент RU 2548408). Установлено, что отсутствие оптического покрытия не вносит заметной систематической погрешности в результаты измерений температуропроводности. По результатам исследований различных покрытий установлено также, что при измерениях методом оптического сканирования ранее традиционно применявшаяся покраска образцов эмалью, недопустимая при изучении пористых и трещиноватых образцов в связи с проникновением красящего вещества в поры и трещины, может быть заменена покрытием образцов самоклеящейся термолентой AVIORA, легко и без остатка удаляемой после измерений, не ухудшающей качество измерений тепловых свойств пород, обладающей устойчивостью к температурам нагрева до 70°C и стабильным поглощением излучения в спектральной области излучения оптических источников тепла, применяемых в установках оптического сканирования.

Описанные варианты подготовки образцов пород к измерениям исключают изменения свойств образцов пористых и трещиноватых пород и создают условия для разработки и внедрения метода непрерывного теплофизического профилирования керна.

Установлены и реализованы возможности для усовершенствования метода оптического сканирования путем выбора новых геометрических характеристик пятна нагрева, повышения скорости сканирования и оптимизацией параметров взаимного расположения источника тепла и областей регистрации температуры на поверхности образцов без ухудшения метрологических характеристик измерений тепловых свойств. С целью снижения теплового воздействия на образцы для исключения перегрева образцов пород во избежание недопустимых изменений органического вещества, что важно при изучении пород баженовской свиты и доманиковой формации, а также для исключения фазовых переходов и активных конвективных процессов в водонасыщенных образцах предложен переход от ранее применявшегося кругового нормально-распределенного источника тепла к эллиптическому пятну нагрева с длинной осью вдоль направления сканирования, что позволило существенно понизить температуру нагрева (Рис. 1) без снижения метрологических характеристик измерений. Эллиптическая форма пятна нагрева реализована при помощи диафрагм в установках для измерений тепловых свойств на полноразмерном керне в кернахранилищах (Рис. 2).

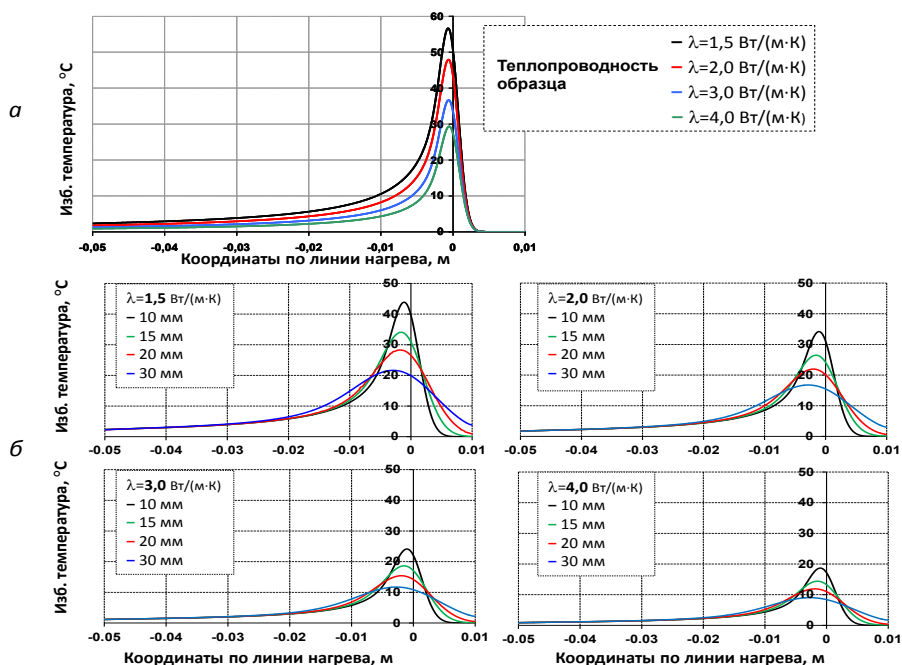


Рис. 1. Расчетные профили избыточной температуры поверхности образцов вдоль линии сканирования в подвижной системе координат (скорость сканирования 4,5 мм/с). а) Нагрев круговым нормально-распределенным источником тепла с диаметром пятна нагрева 5 мм, б) нагрев эллиптическим источником тепла с различными длинными осями эллипса вдоль линии сканирования (данные в рамках) и 5 мм поперечной осью.

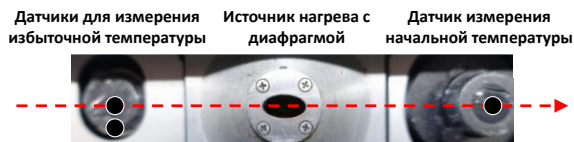


Рис. 2. Диафрагма, обеспечивающая формирование эллиптического пятна нагрева на поверхности образцов пород и эталонных образцов.

Установлено, что повышение скорости сканирования обеспечивает дополнительное снижение максимальной температуры нагрева образцов (Рис. 3), повышение пространственной разрешающей способности при профилировании неоднородных образцов и сокращение времени поточного профилирования полноразмерного керна. Определение необходимых параметров режима измерений в диапазоне тепловых свойств осадочных пород проведено с учетом результатов проведенного анализа случайной и систематической погрешностей измерений теплопроводности (Рис. 4) и температуропроводности (Рис. 5).

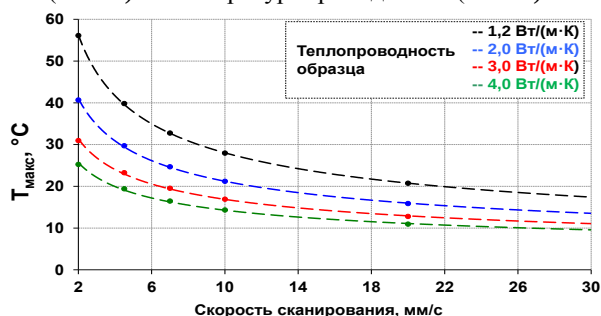


Рис. 3. Зависимость максимальной избыточной температуры нагрева образца от скорости сканирования. Объемная теплоемкость принята равной $2 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

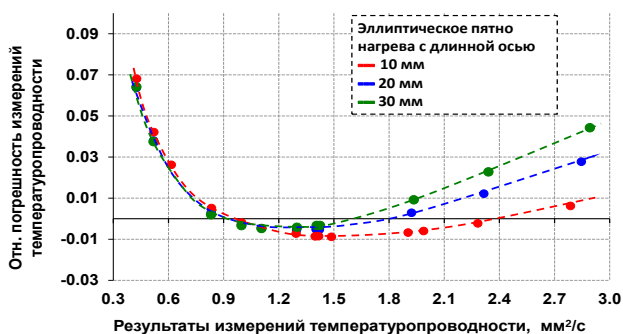


Рис. 4. Зависимость систематической погрешности измерений температуропроводности от результатов измерений при разных параметрах пятна нагрева (стандартные образцы с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К), скорость сканирования 4,5 мм, рабочая база 45 мм).

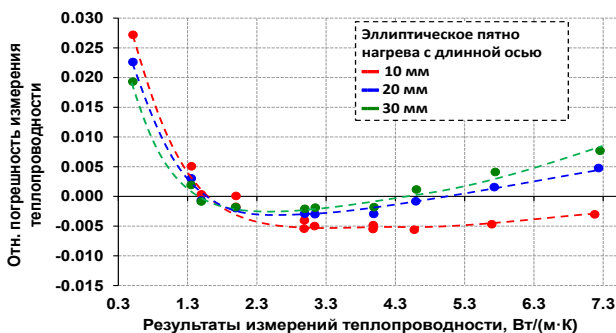


Рис. 5. Зависимость систематической погрешности измерений теплопроводности от результатов измерений при разных параметрах пятна нагрева (стандартные образцы с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К), скорость сканирования 4,5 мм, рабочая база 45 мм).

Выполнена оценка глубины зоны зондирования при теплофизическом профилировании керна. Экспериментально при помощи слоистых моделей твердых тел проанализирована пространственная разрешающая способность и ее зависимости от режима измерений.

Представленные во второй главе результаты являются обоснованием первого научного положения.

В **третьей главе** описаны два новых лазерных прибора оптического сканирования, созданные при участии автора для расширения возможностей тепловой петрофизики, а также подходы к исследованиям тепловых свойств стандартных образцов пород и малогабаритных дубликатов полноразмерного керна. Для нагрева образцов в новых приборах использован полупроводниковый лазер PUMA-970-10 с длиной волны 0,97 мкм (Рис. 6), обеспечивающий повышенную стабильность мощности нагрева образцов по сравнению с использовавшимся ранее CO₂ лазером с водяным охлаждением.

Автономный лазерный модуль оптического сканирования (Рис. 6а) разработан для комбинирования его с установкой для скретч-тестирования керна, применяемой для определения профиля предела прочности на сжатие с помощью царапания (скретчирования) поверхности полноразмерного керна резцом. Теплофизическое профилирование проводится на той же сборке образцов керна, что и поточное скретч-тестирование. Лазерный модуль обеспечивает двунаправленное теплофизическое сканирование образцов керна с разными функциональными возможностями при сканировании в противоположных направлениях (патент RU 2535657). При одном направлении сканирования регистрируются профили теплопроводности с повышенным пространственным разрешением 0,2 мм, при противоположном направлении для этого же ряда образцов керна прибор регистрирует профили комплекса тепловых свойств с пространственным разрешением не ниже 1 мм. Автономный лазерный модуль

может быть интегрирован с установками спектрального гамма-каротажа керна, применяемыми для профилирования керна, что создает условия для поточного профилирования двумя разными физическими методами.

Разработанная мобильная лазерная установка оптического сканирования (Рис. 6б) обладает возможностью гибкого выбора параметров режима измерений в широких диапазонах в зависимости от задач исследований, что позволяет адаптировать режим измерений к различной форме и размерам образцов керна (длина и толщина от 10 мм, толщина от 5 мм), изменять глубину теплового зондирования и пространственную разрешающую способность при регистрации неоднородности пород. Параметры установки обеспечивают ее применение в условиях кернохранилищ для массовых измерений тепловых свойств на стандартных образцах пород, малых фрагментах керна и синтетических образцах, формируемых из шлама и связующего материала при измерениях тепловых свойств на шламе, оперативного контроля за изменением свойств образцов на разных стадиях лабораторных петрофизических исследований.

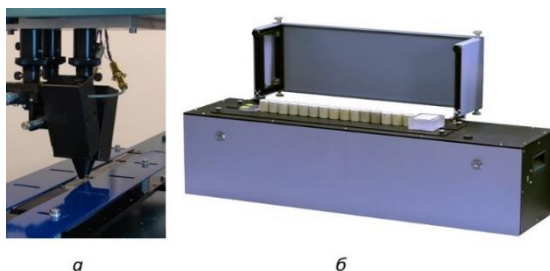


Рис. 6. Автономный лазерный модуль оптического сканирования (а) и переносная лазерная установка с варьируемыми в широких пределах режимами измерений (б).

По результатам метрологических испытаний разработанных лазерных приборов оптического сканирования с использованием сертифицированных образцовых мер тепловых свойств установлено, что приборы обеспечивают измерения тепловых свойств осадочных пород с полной погрешностью не более $\pm 3\%$ для теплопроводности, $\pm 4\%$ для температуропроводности и $\pm 5\%$ для объемной теплоемкости (при доверительной вероятности 0,95).

Путем измерений при помощи разработанных лазерных установок на однородных в литологическом отношении коллекциях стандартных образцов карбонатных пород, пород баженовской свиты и доманиковой формации (всего более 200 образцов) получены данные о теплопроводности и объемной теплоемкости минеральной матрицы пород разных месторождений, необходимые для бассейнового и термогидродинамического моделирования. Для коллекции образцов пород баженовской свиты и доманиковой формации получены данные о связи теплопроводности с общим содержанием органического вещества (Рис.7), проанализированы роль и причины тепловой анизотропии пород баженовской

свиты, по результатам исследований стандартных образцов пород, показаны возможности корректировки теоретических моделей теплопроводности.

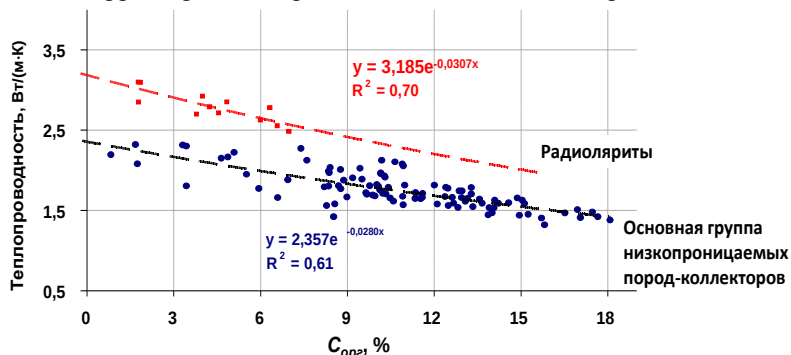


Рис. 7. Поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности $\lambda_{\parallel}$, параллельной напластованию, и параметром $C_{орз}$ (данные пиролиза Е.В. Козловой, Г.А Калмыкова и А.Г. Калмыкова).

На основании исследований образцов пород, вскрытых Тюменской сверхглубокой скважиной СГ-6, разработан подход, позволяющий характеризовать ориентацию неизометричного пустотного пространства. Подход основан на измерениях для образцов пород компонент теплопроводности $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ вдоль и поперек напластования, коэффициентов тепловой анизотропии и неоднородности, объемной теплоемкости и повторных измерениях этих параметров после замены одного вещества-заполнителя порово-трещинного пространства на другое с контрастными тепловыми свойствами по отношению к первому веществу (пары флюидов воздух-вода, вода-керосин (нефть), воздух-керосин (нефть)). Заключение об ориентации неизометричного пустотного пространства, возможных его изменениях при экстрагировании, флюидонасыщении или высушивании делают на основе анализа вариаций указанных свойств при замене одного вещества-заполнителя другим с учетом данных о пористости пород.

Измерения на созданной лазерной установке оптического сканирования компонент тензора теплопроводности вдоль и поперек напластования, объемной теплоемкости, коэффициентов тепловой анизотропии и неоднородности для 126 стандартных образцов пород баженовской свиты до экстрагирования, после донасыщения образцов керосином (модель нефти по тепловым свойствам), после экстрагирования и высушивания, после насыщения моделью пластовой воды позволили установить высокую чувствительность минеральной матрицы пород баженовской свиты к таким воздействиям. Установлены существенные изменения тепловых свойств минеральной матрицы таких пород (что должно соответствовать изменениям и других свойств матрицы пород) после каждого технологического воздействия, что может быть вызвано нарушениями межзерновых контактов и структуры пород.

Для различных типов пород разработан и внедрен в практику петрофизических работ Центра добычи углеводородов Сколтеха систематический оперативный контроль за изменениями свойств матрицы пород и пустотного пространства при различных воздействиях на изучаемые стандартные образцы (экстрагирование, высушивание, нагрев, флюидонасыщение, замораживание и др). Контроль свойств изучаемых стандартных образцов основан на последовательных измерениях и анализе вариаций компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования, объемной теплоемкости и коэффициентов тепловой анизотропии и неоднородности при помощи разработанной мобильной лазерной установки на всех этапах петрофизических исследований. Эффективность контроля обеспечивается неразрушающим, бесконтактным характером измерений, их высокой точностью (случайная погрешность измерений теплопроводности не превышает 1,5% при доверительной вероятности 0,95) и быстротой. Такой контроль позволяет своевременно выявлять и учитывать изменения не только тепловых, но и других, коррелируемых с тепловыми, свойств образцов.

Представленные в третьей главе результаты являются обоснованием второго защищаемого научного положения.

Четвертая глава посвящена описанию нового метода исследований тепловых свойств пород на керне, разработка которого стала возможной благодаря результатам, описанным во второй главе работы, и результатам его применения. Метод основан на непрерывном бесконтактном теплофизическом профилировании полноразмерного керна с пространственной разрешающей способностью 1 мм с последующей обработкой экспериментальных данных совместно с результатами ГИС. Метод обеспечивает профилирование 15-20 метров керна в день без какого-либо воздействия на керн, изменяющего свойства пород.

Впервые в практике геофизических работ метод непрерывного теплофизического профилирования керна применен для исследований около 3000 образцов керна двух оценочных скважин, пробуренных в пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения тяжелой нефти. Зарегистрированы существенные разномасштабные вертикальные вариации компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования, объемной теплоемкости и в отдельных интервалах глубин коэффициента тепловой анизотропии (Рис. 8).

Установлена тесная связь вертикальных вариаций теплопроводности и пористости, оцененной по данным ГИС (Рис.8), что обусловлено значительными контрастами тепловых свойств минеральной матрицы пород и вещества в пустотном пространстве. Существенно более высокая разрешающая способность при регистрации вариаций теплопроводности, чем при регистрации вариаций пористости по ГИС, позволяет уточнить структуру порового пространства путем сравнения и обработки данных о вариациях теплопроводности и данных ГИС по пористости. Предложен способ совместной обработки результатов теплофизического профилирования и данных ГИС, позволивший оценить

вертикальные вариации теплопроводности минеральной матрицы пород, необходимые для термогидродинамического моделирования резервуара при разработке тепловых методов добычи (Рис.8). Полученные для связи теплопроводности с пористостью уравнения регрессии позволили характеризовать вариации пористости в пределах образцов пород по профилям теплопроводности.

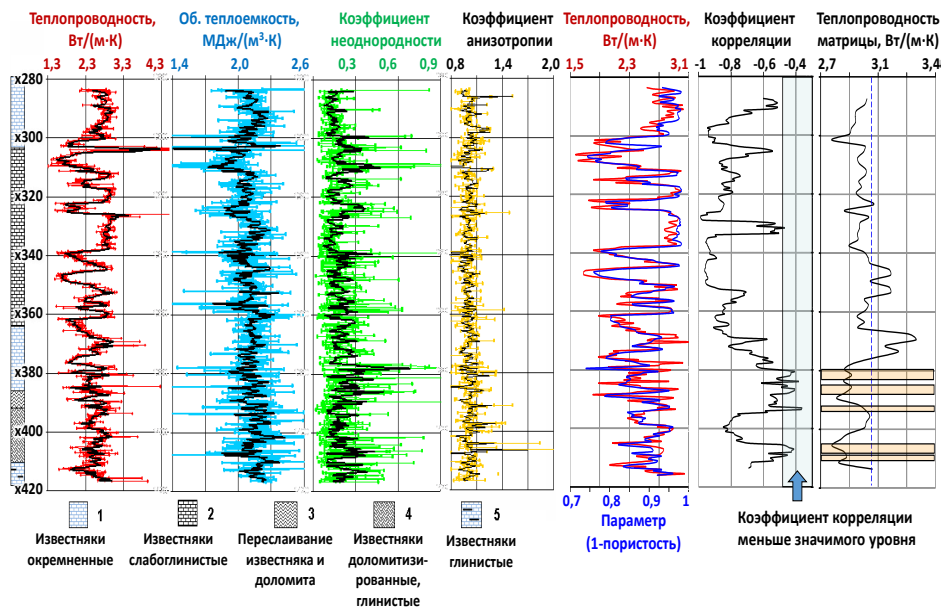


Рис. 8. Распределение тепловых свойств пород вдоль скважины Б Усинского месторождения тяжелой нефти (в левых 4 колонках - результаты усреднения профилируемых тепловых свойств для каждого образца керна), данные о корреляции между теплопроводностью и пористостью и вертикальные вариации теплопроводности минеральной матрицы (правые три колонки).

Установлены тесные связи между вертикальными вариациями теплопроводности и скоростью продольных упругих волн и плотности (Рис.9), что для высокопористых пород коллекторов объясняется высоким контрастом не только тепловых, но и ряда других свойств порового флюида и минеральной матрицы пород.

Охарактеризованная в главе 3 тесная связь между теплопроводностью и общим содержанием органического вещества C_{org} стала основой для созданного подхода для определения C_{org} по результатам измерений параллельной (в плоскости слоистости) компоненты теплопроводности пород баженовской свиты и доманиковой формации. Тесные связи теплопроводности с C_{org} обусловлены значительными контрастами теплопроводности для минеральной матрицы пород баженовской свиты и доманиковой формации (2,5-3,2 Вт/(м·К)) и органического

вещества (по оценкам автора, приведенным в работе, средние значения по скважинам 0,22-0,60 Вт/(м·К) для баженовской свиты и 0,28-0,64 Вт/(м·К) для доманиковой формации). Тесной связи способствуют малые различия в теплопроводности минералов для пород баженовской свиты и доманиковой формации (локальные проявления высокотеплопроводного пирита легко распознаются на профилях теплопроводности и исключаются при обработке).

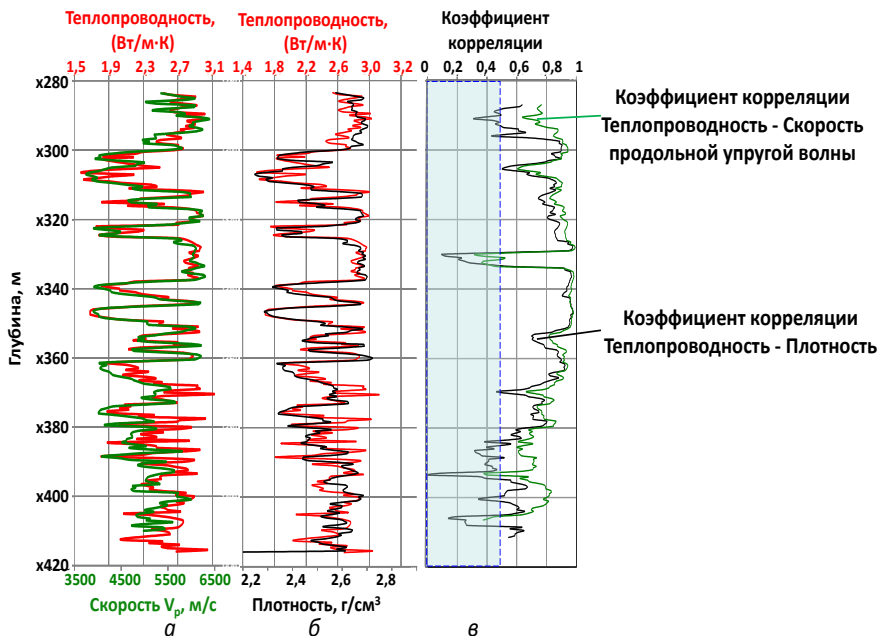


Рис. 9. Взаимосвязи вариаций теплопроводности пород, скорости продольной упругой волны (а) и плотности (б), вертикальное распределение коэффициентов корреляций этих связей (в) вдоль скважины Б Усинского месторождения.

Разработанные с участием автора способы оценки $C_{орг}$ по данным о теплопроводности пород позволили преобразовывать результаты профилирования теплопроводности в профили $C_{орг}$ вдоль скважин с пространственным разрешением 1 мм и оценивать средние значения $C_{орг}$ для каждого образца керна.

Один из предложенных методов определения $C_{орг}$ по данным о теплопроводности основан на уравнении связи теплопроводности и $C_{орг}$

$$C_{орг} = \frac{\ln \frac{\lambda_{матр}}{\lambda_{изм}}}{k}, \quad (2)$$

где $\lambda_{матр}$ - теплопроводность матрицы породы, $\lambda_{изм}$ – результат измерения теплопроводности породы. Параметр k выбирают на основе результатов непрерывного профилирования теплопроводности керна и данных пиролиза для конкретных месторождений и сформированных баз данных. Оценка теплопроводности матрицы пород в различных интервалах глубин основана на анализе вариаций теплопроводности в пределах образца керна.

Значения $C_{орг}$, определенные по результатам теплофизического профилирования, находятся в хорошем соответствии с данными пиролиза (Рис. 10), что протестировано для 34 скважин и более чем на 900 результатах пиролиза. Повышение $C_{орг}$ сопровождается повышением коэффициента тепловой неоднородности, что отражает характер распределения органического вещества в образцах (Рис.10).

В то время, как исследования путем пиролиза проводятся на малых образцах, объем которых не превышает 0,3 см³, объем образца керна, охватываемый при теплофизическом профилировании, составляет 13-30 см³ в зависимости от длины образца. С учетом того, что теплофизическое профилирование проводится для всего керна, а для пиролиза отбираются 3-5 образцов на 1 метр, данные о $C_{орг}$ по профилям теплопроводности характеризуют в 120-200 раз больший объем породы, чем при пиролизе, что при высокой неоднородности пород баженовской свиты и доманиковой формации позволяет детализировать вариации $C_{орг}$ и помогает обоснованному отбору образцов на пиролиз.

При отсутствии необходимых данных о параметрах уравнения регрессии и в случаях трудностей с использованием предыдущего подхода предложено определять $C_{орг}$ по данным о теплопроводности согласно соотношению

$$C_{орг} = \left(1 + \frac{\rho_{матр}}{\rho_{кер}} \cdot \frac{\ln \frac{\lambda_{кер}}{\lambda_{изм}}}{\ln \frac{\lambda_{изм}}{\lambda_{матр}}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $\lambda_{кер}$ – теплопроводность органического вещества, $\rho_{матр}$ и $\rho_{кер}$ – плотность соответственно матрицы и органического вещества.

В большинстве случаев данные пиролиза необходимы для уточнения (калибровки) абсолютных оценок $C_{орг}$ по теплопроводности в отдельных интервалах глубин. Вместе с тем, характер вариаций $C_{орг}$ вдоль скважины, установленный по теплопроводности даже без учета данных пиролиза, практически всегда сохраняется.

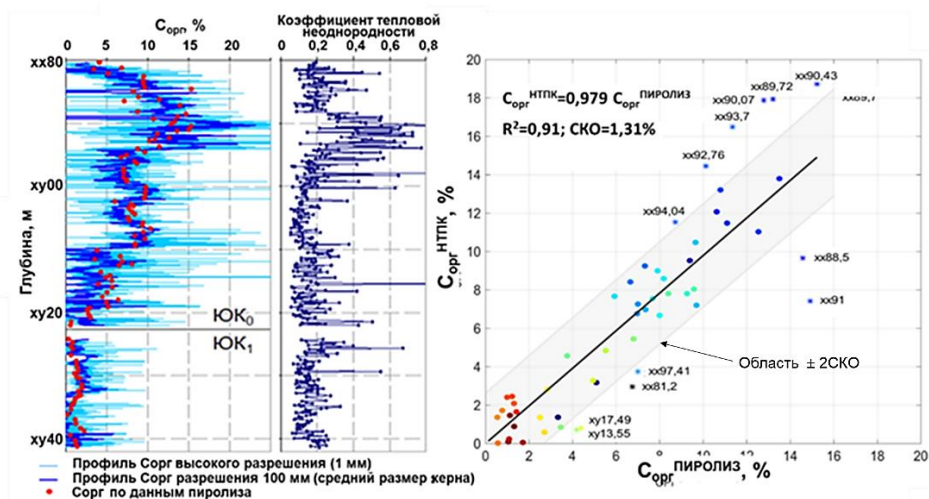


Рис. 10. Результаты высокоразрешающего (1 мм) профилирования $C_{орг}$ по данным непрерывного теплофизического профилирования зерна (НТПК) и оценки $C_{орг}$ путем пиролиза. На правой панели приведены средние для образцов полноразмерного зерна значения $C_{орг}$ по данным НТПК. Точки вне серого поля (95% доверительный интервал для результатов определений $C_{орг}$ методом НТПК) соответствуют образцам, отобраным для пиролиза (объем образцов около 0,4 см³) из образцов полноразмерного зерна (средняя длина 10 см), обладающих высокой неоднородностью из-за неравномерного распределения в них органического вещества (средняя панель).

Показано, что результаты теплофизического профилирования полноразмерного зерна улучшают возможности для целенаправленного отбора образцов зерна и участков для выбуривания стандартных образцов пород для последующих лабораторных петрофизических исследований. Для этого используются полученные данные 1) о теплофизической зональности пород вдоль скважины и 2) о вариациях теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии в пределах каждого отобранного образца.

В пятой главе диссертации обобщены результаты применения защищаемых разработок в период 2015-2019 гг. для впервые проведенных обширных теплофизических исследований пород 29 месторождений с изучением около 11000 образцов зерна из 42 скважин, вскрывших баженовскую свиту и доманиковую формацию. Новые аппаратно-методические разработки, описанные в работе, позволили получить уникальную по своей представительности информацию о пространственных вариациях теплопроводности, объемной теплоемкости, коэффициента тепловой анизотропии и неоднородности пород. На Рис.11 приведены примеры данных, полученных при непрерывном теплофизическом профилировании зерна для скважин, вскрывших баженовскую свиту.

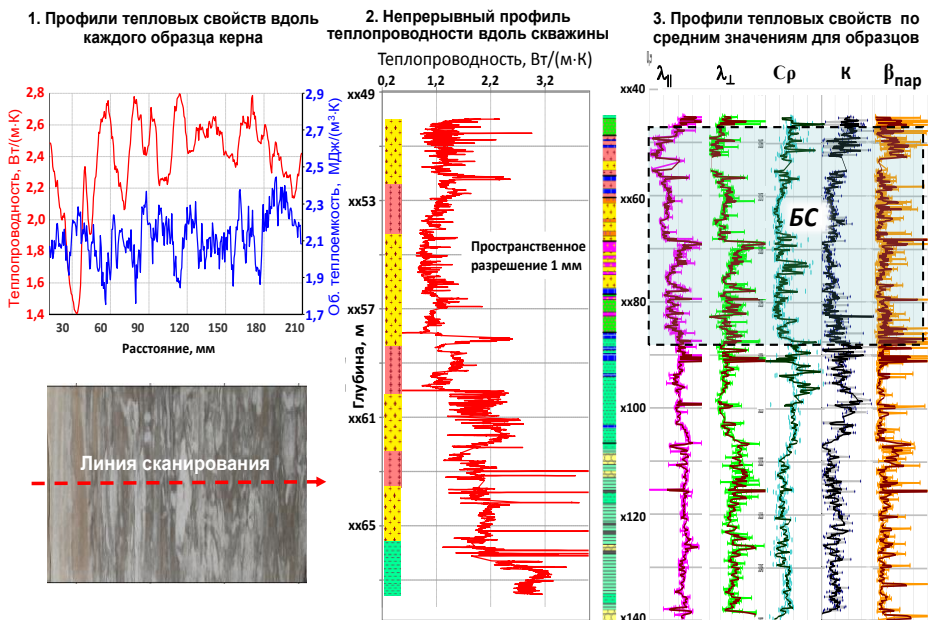


Рис. 11. Данные, получаемые в результате непрерывного теплофизического профилирования керна скважины (пример) ($\beta_{\text{пар}}$ – коэффициент тепловой неоднородности при сканировании вдоль оси керна, БС- баженовская свита).

На основе совместной обработки результатов теплофизического профилирования и данных ГИС (акустического, гамма-гамма плотностного и гамма-каротажа) установлены тесные корреляции теплопроводности с рядом других свойств пород баженовской свиты и доманиковой формации, что обусловлено значительным контрастом этих свойств, как и теплопроводности, для органического вещества и матрицы пород. Показано, что благодаря этому метод непрерывного теплофизического профилирования керна скважин создает предпосылки для повышения качества определения содержания органического вещества, выполняемого при помощи гамма-каротажа, предоставляет данные об акустической анизотропии пород в тех интервалах глубин, где отсутствуют данные об анизотропии упругих свойств по результатам акустического каротажа.

Приведенные результаты исследований показывают целесообразность более широкого внедрения теплофизического профилирования керна применительно к различным задачам поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов в баженовской свите и доманиковой формации.

Результаты исследований, представленные в четвертой и пятой главах, обосновывают третье научное положение.

В пятой главе работы также приведены обобщенные характеристики тепловых свойств пород баженовской свиты, доманиковых отложений и вмещающих толщ, полученные при экспериментальных исследованиях с применением метода непрерывного теплофизического профилирования керна. Согласно экспериментальным данным, породы баженовской свиты и доманиковых отложений характеризуются значительной тепловой анизотропией и существенной тепловой неоднородностью. «Бажениты» отличаются от «доманикитов» повышенной тепловой анизотропией (диапазоны средних коэффициентов тепловой анизотропии по отдельным скважинам составляют соответственно 1,40-1,90 и 1,07-1,27 при общих средних значениях 1,59 (СКО 0,16) и 1,16 (СКО 0,06). Породы доманиковых отложений отличаются от «баженитов» повышенным коэффициентом тепловой неоднородности (диапазоны средних значений по отдельным скважинам соответственно 0,15-0,48 и 0,11-0,40 при общих средних значениях 0,30 (СКО 0,12) и 0,22 (СКО 0,08)), что отражает текстурные особенности пород.

Приведены оценки степени тепловой анизотропии пород, связанной со слоистым чередованием пропластков органического вещества, существенно отличающегося по теплопроводности от вещества матрицы пород. Показано, что чередование пропластков низкотеплопроводной органики в породах баженовской свиты и доманиковой формации следует считать одной из главных причин высокой тепловой анизотропии. Дополнительной причиной высокой анизотропии является «наведенная» ориентированная микротрещиноватость пород.

Результаты исследований пород баженовской свиты и доманиковой формации создают основу для формирования баз данных по комплексу тепловых свойств пород для бассейнового и термогидродинамического моделирования.

Результаты экспериментальных исследований тепловых свойств пород баженовской свиты и доманиковой формации, представленные в пятой главе, обосновывают четвертое научное положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработаны подходы к измерениям тепловых свойств пород без применения оптического покрытия образцов керна или с покрытием их термопленкой, исключающие изменения свойств пористых и трещиноватых образцов пород (патент RU 2548408).

2. Разработаны и внедрены рекомендации по применению эллиптической формы пятна нагрева и повышению скорости сканирования для снижения максимальной температуры нагрева образцов и увеличения скорости измерений тепловых свойств пород на керне.

3. Разработаны автономный лазерный модуль для комплексирования высокоразрешающего непрерывного теплофизического профилирования керна с механическим скретч-тестированием (патент RU 2535657) и гамма-спектрометрическим профилированием полноразмерного керна и мобильная лазерная установка оптического сканирования для измерений тепловых свойств пород на стандартных образцах пород и мелких фрагментах керна с широким диапазоном вариаций параметров режима измерений.

4. Разработан подход к анализу трещиноватости пород, основанный на измерениях главных значений тензора теплопроводности образцов пород при заполнении порового пространства веществами с различной теплопроводностью.

5. По результатам исследований теплопроводности и данным пиролиза для коллекций образцов баженовской свиты и доманиковой формации разработан метод регистрации детальных вариаций общего содержания органического вещества C_{org} вдоль скважин по данным непрерывного теплофизического профилирования керна.

6. Показано, что контроль вариаций компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования и объемной теплоемкости образцов пород позволяет анализировать и выявлять изменения минеральной матрицы и пустотного пространства в процессе лабораторных петрофизических работ.

7. Показана возможность применения теплофизического профилирования керна для обоснованного отбора образцов керна и участков для выбуривания стандартных образцов пород для дальнейших лабораторных петрофизических исследований.

8. Разработан метод изучения коллекторов, основанный на непрерывном теплофизическом высокоразрешающем профилировании полноразмерного керна с последующей обработкой результатов совместно с данными ГИС.

9. Методом непрерывного теплофизического профилирования изучено около 3000 образцов керна двух оценочных скважин, пробуренных в пермокарбоновой залежи Усинского месторождения тяжелой нефти, получены

представительные данные о тепловых свойствах для термогидродинамического моделирования резервуара при разработке тепловых методов добычи, включая данные о вариациях теплопроводности минеральной матрицы вдоль скважин.

10. Методом непрерывного теплофизического профилирования исследованы коллекции керна скважин, пробуренных в 29 месторождениях баженовской свиты и доманиковой формации, что позволило получить уникальную по представительности информацию о тепловых свойствах пород.

11. Установлены тесные связи теплопроводности с данными ГИС по пористости, скорости продольной упругой волны, плотности для традиционных коллекторов, скоростям упругих волн, плотности, естественной радиоактивности для пород баженовской свиты и доманиковой формации, что объясняется высоким контрастом свойств минеральной матрицы пород со свойствами порового вещества в первом случае и со свойствами органического вещества во втором случае. Установленные связи и соответствующие им уравнения регрессии имеют как общие, так и характерные особенности для пород разных месторождений.

Таким образом, в работе решена задача развития экспериментальной базы тепловой петрофизики применительно к теплофизическим исследованиям пород месторождений трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов углеводородов, что позволило повысить эффективность петрофизических исследований месторождений при решении задач поиска, разведки и разработки.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных 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. -№2. -С. 63-68.
2. Пашкевич Р.И., **Попов Е.Ю.**, Тарелко Н.Ф., Чернев И.И., Павлов К.А., Муратов П.В. Новые данные о тепловых свойствах пород геотермальных месторождений Камчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-технический журнал). Отдельный выпуск. 2014. -С. 36-46.
3. **Попов Е.Ю.** Бесконтактные измерения теплопроводности и температуропроводности полноразмерного керна без выравнивания оптических характеристик образцов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. -№ 4. - С. 41-47.
4. **Попов Е.Ю.**, Савельев Е.Г. Регистрация пространственных вариаций свойств образцов пород на основе метода оптического сканирования // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. -№ 5. -С. 40-46.
5. Пашкевич Р.И., **Попов Е.Ю.**, Савельев Е.Г., Ромушкевич Р.А., Павлов К.А. Экспериментальные исследования тепловых свойств пород Авачинской геотермальной системы, Камчатка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. -№ 63. -С. 7-23.
6. **Попов Е.Ю.**, Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Теплофизическое профилирование керна при доизучении геологического строения пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения // Геология и разведка. 2016. -№ 6. -С. 38-49.
7. **Попов Е. Ю.**, Калмыков Г.А., Стенин В.П., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю. Тепловые свойства пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. -№ 10.-С. 32-37.
8. **Попов Е.Ю.**, Ромушкевич Р.А., Попов Ю.А. Измерения тепловых свойств пород на стандартных образцах как необходимый этап теплофизических исследований месторождений углеводородов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2017. -№ 2. -С.56-70.
9. **Попов Е.Ю.**, Чехонин Е.М., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Габова А.В., Жуков В.В. Новый подход к изучению баженовской свиты на основе теплофизического профилирования керна // Недропользование – XXI век. 2016. -№ 6 (63). -С.52-61.
10. Попов Ю.А., **Попов Е.Ю.**, Чехонин Е.М., Габова А.В., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Заграновская Д.Е. Исследование баженовской свиты с

применением непрерывного профилирования тепловых свойств на керне // Нефтяное хозяйство. 2017. -№ 3. -С.22-27.

Патенты

11. **Попов Е.Ю.**, Попов Ю.А., Паршин А. В. Способ определения теплопроводности и температуропроводности материалов: Патент RU 2548408, Россия, опубл. 20.04.2015.
12. Попов Ю.А., **Попов Е.Ю.**, Паршин А.В. Способ и устройство для определения теплопроводности и температуропроводности неоднородного материала. Патент RU 2535657, Россия, опубл. 20.12.2014.

В изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

13. Popov Y., Pimenov V., Pevzner L., Romushkevich R., **Popov E.** Geothermal characteristics of the Voritilivo deep borehole drilled into the Puchezh-Katunk impact structure // Tectonophysics. 1998. -Vol. 30. -P.72-83.
14. **Popov E.**, Trofimov A., Goncharov A., Abaimov S., Chekhonin E., Popov Y., Sevostianov I. Technique of rock thermal conductivity evaluation on core cuttings and nonconsolidated rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. -Vol.108. -P.15-22.
15. Chekhonin E., **Popov E.**, Popov Y., Gabova A., Romushkevich R., Spasennykh M., Zgranovskaya D. High-Resolution Evaluation of Elastic Properties and Anisotropy of Unconventional Reservoir Rocks via Thermal Core Logging // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. -Vol. 51. -P. 2747–2759.
16. Meshalkin Y., Koroteev D., **Popov E.**, Chekhonin E., Popov Y. Robotized petrophysics: Machine learning and thermal profiling for automated mapping of lithotypes in unconventional // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. -Vol. 167. -P. 944-948.

Расширенные тезисы докладов в сборниках трудов конференций, индексируемых в Scopus

17. Popov Yu., Parshin A., Chekhonin E., **Popov E.**, Miklashevskiy D., Suarez-Rivera R., Green S. Continuous core thermal properties measurements and analysis. 47th US Rock Mechanics Symposium 2013. ARMA 13-391. -Vol.4. -P.2991-2999.
18. **Попов Е.Ю.**, Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Герасимов И.В., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Результаты доизучения геологического строения пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения путем непрерывного теплофизического профилирования керна. EAGE «Геомодель-2014», Геленджик, Россия, 8-11 сентября, 2014.
19. **Попов Е.Ю.**, Калмыков Г.А., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Плешаков А.М. Теплопроводность пород как индикатор общего

содержания органического вещества пород баженовской свиты. EAGE «Геомодель-2015», Геленджик, Россия, 2015.

20. **Попов Е.Ю.**, Габова А.В., Карпов И.А., Заграновская Д.Е., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Чехонин Е.М., Попов Ю.А. Связь теплопроводности и естественной радиоактивности пород баженовской свиты по данным гамма-каротажа, гамма-спектрометрии и теплофизического каротажа на керне EAGE «Геомодель-2016», Геленджик, РФ, 12-16 сентября, 2016.
21. **Попов Е. Ю.**, Ромушкевич Р. А., Габова А. В., Чехонин Е. М., Попов Ю. А., Спасенных М. Ю., Заграновская Д. Е., Беленькая И. Ю., Калмыков Г. А. Формирование базы исходных данных о тепловых свойствах пород баженовской свиты для бассейнового и гидродинамического моделирования. EAGE «Геомодель-2016». Геленджик, РФ, 12-15 сентября, 2016.
22. **Попов Е.Ю.**, Ромушкевич Р.А., Габова А.В., Савельев Е.Г., Попов Ю.А., Романов Ю.К., Спиридонов Д.А. Тепловые свойства пород баженовской свиты Сургутского и Нижневартовского сводов Западно-Сибирской плиты по результатам непрерывного профилирования керна. EAGE «Геомодель-2017», Геленджик, Россия, 11-14 сентября, 2017.
23. **Попов Е.Ю.**, Попов Ю.А., Габова А.В., Чехонин Е.М., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Стенин В.П., Делия С.В., Шаяхметов Т.Р., Драндусов К.А. Результаты комплексных исследований доманиковой формации путем непрерывного теплофизического профилирования керна. EAGE «Геомодель-2017» Геленджик, Россия, 11-14 сентября, 2017.

Раздел в монографии

24. Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., **Попов Е.Ю.** Теплофизические исследования пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины // В кн. «Тюменская сверхглубокая скважина». - Пермь: Изд. КамНИИКИГС и ГНПП "Недра", 1996. С. 57-72.

Подписано в печать 20.11.2019 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,0 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.
Тел./факс: (499) 254 90 88.