

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО И
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

На правах рукописи

УДК 550.362

НОВИКОВ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
И НАСЫЩАЮЩИХ ФЛЮИДОВ**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете
им. Серго Орджоникидзе

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
проф. Ю.А. Попов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
проф. Е.А. Поляков (РГГРУ)
кандидат геолого-минералогических наук,
Н.Н. Богданович (СК «ПетроАльянс»)

Ведущая организация: Башкирский государственный университет

Защита состоится 22.10.09 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д
212.121.07 при Российском государственном геологоразведочном университете им.
Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, ауд. 6-
38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ.

Отзывы, заверенные печатью учреждения, в двух экземплярах просим направлять по
адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, РГГРУ, Ученому секретарю
диссертационного совета.

Автореферат разослан 22.09.2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук, проф.



А.Д. Каринский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Тенденции развития нефтяной геофизики за последние десятилетия характеризуются существенным возрастанием роли геотермических и петротепловых исследований, как в рамках отдельных нефтяных месторождений, так и в масштабах крупных осадочных бассейнов с запасами углеводородов. В обоих случаях это обуславливает необходимость получения представительных данных о тепловых свойствах коллекторов.

Проектирование и оптимизация методов добычи нефти с тепловым воздействием на продуктивный пласт, особенно при добыче вязких нефтей, интерпретация данных термокаротажа, моделирование процессов тепло- и массопереноса в коллекторах на различных стадиях освоения месторождений, изучение тепловых режимов глубоких горизонтов в осадочных бассейнах, анализ влияния теплового режима недр на процессы формирования залежей углеводородов – при всех этих работах необходима информация о таких тепловых свойствах коллекторов, как теплопроводность, температуропроводность и объемная теплоемкость. Такая тепловая характеристика нефтенасыщенных пород, как температурный коэффициент линейного расширения, требуется для точных оценок напряженного состояния околоскважинного пространства и массива горной породы при использовании тепловых методов воздействия на пласт. В связи с этим повышение уровня достоверности информации о перечисленных тепловых свойствах коллекторов, и в частности – терригенных коллекторов, является актуальной задачей современной геофизики.

Современная тепловая петрофизика характеризуется отсутствием достаточно надежных средств для измерений тепловых свойств пород в скважинах (теплового каротажа). В связи с этим изучение этих свойств в настоящее время возможно в основном путем измерений на керне при нормальных термобарических условиях с последующим изучением влияния пластовых давлений и температур на отдельных образцах. Но для теплофизических исследований нефтенасыщенных пород на керне даже при нормальных условиях до последнего времени существовали серьезные трудности, что являлось причиной острого недостатка в справочной и научно-технической литературе информации о теплопроводности и особенно температуропроводности, объемной теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения нефтенасыщенных коллекторов и отсутствия надежных баз данных об этих свойствах для различных нефтяных месторождений.

В этих условиях в нефтяной петрофизике важной задачей до последнего времени являлось повышение уровня экспериментальных теплофизических исследований нефтенасыщенных пород на керне лабораторными методами при нормальных условиях и получение представительных, метрологически обоснованных данных о тепловых свойствах коллекторов, в частности – терригенных коллекторов,

для разных месторождений углеводородов. В рамках этой задачи необходимым является также развитие инженерных (несложных, но одновременно достаточно надежных) теоретических моделей эффективных тепловых свойств флюидонасыщенных пород и создание на их основе подходов к прогнозу тепловых свойств нефтенасыщенных пород-коллекторов.

Теплопроводность пород-коллекторов существенно зависит от теплопроводности поронасыщающих флюидов, что необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений, теоретическом моделировании и прогнозе теплопроводности коллекторов. Вместе с тем существуют серьезные проблемы с надежным аппаратно-методическим обеспечением экспериментальных исследований тепловых свойств флюидов, что является причиной недостатка экспериментальной информации о тепловых свойствах разных флюидов (пластовая вода, легкие и тяжелые нефти и др.). Все это определяет важность разработки более совершенных средств для измерений теплопроводности флюидов, метрологической проверки их надежности и получения представительной экспериментальной информации об этой характеристике.

Решение перечисленных задач должно способствовать повышению надежности данных о связях тепловых свойств с другими физическими свойствами нефтенасыщенных коллекторов, в первую очередь – с коллекторскими свойствами.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности тепловых методов добычи нефти и изучения процессов тепло- и массопереноса в осадочных бассейнах с запасами углеводородов путем развития теоретической и экспериментально-методической базы для получения надежных данных о тепловых свойствах нефтенасыщенных горных пород и насыщающих флюидов и повышения представительности экспериментальной информации о тепловых свойствах коллекторов и их связи с другими физическими свойствами коллекторов.

Основные задачи исследований

В соответствии с поставленной целью в работе решается ряд конкретных задач, основными из которых являются:

1. Повышение представительности существующей базы данных о тепловых свойствах терригенных коллекторов (кварцевых песчаников) нефтяных месторождений – теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, температурного коэффициента линейного расширения – путем прецизионных массовых измерений на представительных коллекциях ядра с учетом тепловой анизотропии и неоднородности пород на уровне образца и пласта.

2. Установление корреляционных связей тепловых свойств с коллекторскими и другими физическими свойствами нефтенасыщенных пород.
3. Разработка и метрологическое тестирование аппаратуры для измерений теплопроводности флюидов и проведение при ее помощи измерений теплопроводности нефтей, бурового раствора и других порозаполняющих флюидов в широком диапазоне температур.
4. Повышение эффективности применения при теплофизических исследованиях терригенных коллекторов широко распространенной в петрофизике теоретической модели эффективной теплопроводности Лихтенеккера-Асаада, оценка вариаций значений корректировочного коэффициента данной теоретической модели для нефтенасыщенных горных пород и изучение его связи с геометрическими характеристиками порового пространства.
5. Разработка методики прогноза теплопроводности нефтенасыщенных терригенных коллекторов на основе теоретического моделирования.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе массовых измерений тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости и температурного коэффициента линейного расширения) нефтенасыщенных пород-коллекторов на коллекциях керна впервые получены представительные метрологически обоснованные данные о тепловых свойствах терригенных коллекторов (кварцевых песчаников) с учетом тепловой анизотропии и неоднородности пород на уровне каждого образца.
2. По результатам обширных экспериментальных исследований установлены корреляционные зависимости между тепловыми, емкостными, акустическими и фильтрационными свойствами терригенных коллекторов, насыщенных нефтью (включая тяжелую нефть) и другими флюидами, замещающими нефть при тепловых методах добычи.
3. Разработан и метрологически проанализирован аппаратно-методический комплекс для измерений теплопроводности нефтей и других флюидов в диапазоне температур от 0 до 160 °С.
4. На основе измерений, проведенных при помощи разработанной аппаратуры, получены данные о теплопроводности нефтей различных месторождений и бурового раствора в широком температурном диапазоне.
5. Экспериментально установлены значения корректировочного коэффициента теоретической модели Лихтенеккера-Асаада для нефтенасыщенных терригенных коллекторов, что обеспечило применимость этой модели при прогнозе теплопроводности кварцевых нефтенасыщенных песчаников.
6. Разработана методика прогноза теплопроводности нефтенасыщенных кварцевых песчаников по экспериментальным данным о теплопроводности пород в их

воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях с последующим применением теоретической модели Лихтенеккера-Асаада.

Защищаемые научные положения

1. Экспериментальные результаты о теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости и коэффициенте тепловой анизотропии, полученные в результате прецизионных измерений более чем на 250 образцах кварцевых песчаников, насыщенных тяжелой нефтью и другими порозаполняющими флюидами, значительно расширяют базу данных по тепловым свойствам терригенных коллекторов и их корреляционным связям с другими физическими свойствами коллекторов, помогают осуществить прогноз вариаций тепловых свойств в процессе термодобычи.
2. Разработанная аппаратурно-методическая база для измерений теплопроводности флюидов обеспечивает повышение надежности экспериментальной информации о теплопроводности порозаполняющих флюидов, необходимой для интерпретации результатов теплофизических исследований коллекторов и прогноза их тепловых свойств на основе теоретического моделирования.
3. Экспериментально установленные диапазоны вариаций температурного коэффициента линейного расширения кварцевых песчаников при температуре от 20 до 170 °С предоставляют возможность для более точных оценок напряженного состояния околоскважинного пространства и горного массива при использовании тепловых методов воздействия на пласт.
4. Установленные требования к точности определения исходных параметров теоретической модели Лихтенеккера-Асаада и полученные значения корректировочного коэффициента этой модели для нефтенасыщенных кварцевых песчаников обеспечивают прогноз теплопроводности коллекторов данного типа на основе этой теоретической модели.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- активное участие в организации и проведении массовых измерений тепловых свойств коллекций кварцевых песчаников, насыщенных нефтью, пластовой водой и воздухом с различных нефтяных месторождений;
- корреляционный анализ результатов измерений комплекса физических свойств пород нефтяных месторождений;
- создание аппаратурно-методической базы для измерений теплопроводности флюидов и ее метрологические исследования;
- измерения теплопроводности различных нефтей, бурового раствора, пластовой воды цемента при помощи разработанных аппаратуры и методики;
- разработка комплекса требований к качеству исходных параметров теоретической модели Лихтенеккера-Асаада для обеспечения необходимой

надежности оценки теплопроводности нефтенасыщенных пород на основе данной модели;

- определение корректирующего коэффициента теоретической модели Лихтенеккера-Асаада для кварцевых песчаников и анализ взаимосвязи этого коэффициента с геометрическими характеристиками порового пространства;
- разработка методики прогноза теплопроводности нефтенасыщенных пород по данным о теплопроводности воздушно-сухих и водонасыщенных пород.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Результаты измерений комплекса тепловых свойств терригенных коллекторов одного из месторождений вязких нефтей, установленные диапазоны пространственных вариаций тепловых свойств в пределах месторождения и в зависимости от вида насыщающих флюидов являются важным элементом для создания теплофизической 4D-модели месторождения и оценок напряженного состояния горного массива при проектировании и оптимизации нефтедобычи при помощи термических методов.
2. Экспериментальные данные о тепловых свойствах нефтенасыщенных кварцевых песчаников в совокупности с результатами других петрофизических измерений на тех же образцах позволили установить взаимосвязь тепловых свойств с емкостными, фильтрационными и акустическими свойствами, что необходимо для прогноза теплового режима коллектора и осуществления сейсмомониторинга месторождения тяжелой нефти.
3. Разработанная аппаратурно-методическая база для измерений теплопроводности флюидов с учетом влияния их тепловой конвекции в процессе измерений используется для получения экспериментальных данных о теплопроводности нефти, бурового раствора и пластовой воды в широком диапазоне температур, для прогноза вариаций теплопроводности пород-коллекторов в процессе добычи тяжелых нефтей при помощи термических методов, моделирования теплопроводности пород при их насыщении разными флюидами по данным о теплопроводности минерального скелета, пористости и геометрических характеристиках порового пространства.
4. Расширение области применимости теоретической модели Лихтенеккера-Асаада обеспечивает прогноз теплопроводности терригенных коллекторов по данным о пористости и теплопроводности минерального скелета пород.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты работы внедрены в Научно-исследовательской лаборатории проблем геотермии Российского государственного геологоразведочного университета,

применяются компаниями ООО «Технологическая компания Шлюмберже», СК «ПетроАльянс» и ООО «Лукойл» и использованы в работах РГГРУ по проектам, поддерживаемым Российским фондом фундаментальных исследований.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на V Международной конференции молодых ученых и специалистов «Геофизика-2003», Международной конференции «Тепловое поле Земли и методы его изучения» в 2008 г., Международных конференциях «Новые идеи в науках о Земле» в 2003, 2005, 2007 и 2009 г.г., Всероссийской конференции-конкурсе студентов выпускного курса ВУЗов минерально-сырьевого комплекса России в 2006 г., конференции «Молодые - наукам о Земле» в 2006 и 2008 г.г., X юбилейной международной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2009» в 2009 г.

Публикации

Результаты работы отражены в 4 научных статьях и 12 тезисах докладов, сделанных на Международных научных конференциях.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 115 страниц машинописного текста, 65 рисунков, 8 таблиц и библиографию из 111 наименований.

Работа выполнена в Научно-исследовательской лаборатории Проблем геотермии при кафедре технической физики и кибернетики Российского государственного геологоразведочного университета.

Автор глубоко благодарен научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Попову Ю.А. за участие в становлении автора как исследователя, большую помощь в научной работе и подготовке диссертации. Автор выражает искреннюю признательность доктору технических наук, профессору В.А. Вертоградскому за совершенствование научно-технической подготовки автора, благодарит А.П. Лазаренко за помощь при разработке аппаратуры, признателен заведующей НИЛ Проблем геотермии РГГРУ Р.А. Ромушкевич за многочисленные консультации при геологическом анализе коллекций и расширение его геологического кругозора, к.ф.-м.н. И.О. Баяк за помощь при петротепловых исследованиях теоретического характера, к.т.н. Д.Е. Миклашевскому за помощь при разработке программного обеспечения для измерительной аппаратуры. Автор пользуется случаем поблагодарить всех сотрудников кафедры технической физики и кибернетики РГГРУ и НИЛ Проблем геотермии РГГРУ за внимание, помощь и ценные советы в ходе выполнения работы. Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам НИЛ Проблем геотермии Д.Н. Горобцову, А.О. Черепанову и В.Ю. Татаринovu за помощь

при экспериментальных исследованиях и считает своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам Московского исследовательского центра компании Шлюмберже С.С. Сафонову, В.В. Шако и В.В.Тертычному за большую помощь при проведении исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены защищаемые положения, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад автора.

В **Главе 1** дан анализ современного состояния аппаратно-методической базы для изучения тепловых свойств нефтенасыщенных осадочных пород - теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, температурного коэффициента линейного расширения - и имеющихся баз данных по тепловым свойствам нефтенасыщенных пород.

Показан большой вклад в изучении тепловых свойств нефтяных коллекторов ученых России и стран СНГ Б.А. Яковлева, А.А. Липаева, А.Н. Масленникова, Б.П. Поршакова, Д.И. Дьяконова, С.А. Николаева, А.Н. Соломатина и др.

Применительно к экспериментальным теплофизическим исследованиям нефтенасыщенных коллекторов проанализированы достоинства и недостатки методов и приборов, ранее разработанных для измерений тепловых свойств в скважинах (т.е. аппаратно-методического обеспечения теплового каротажа) и представляющих наибольший практический и научный интерес. Показано, что все современные методы теплового каротажа можно разделить на следующие основные группы: 1) на основе подвижных измерительных зондов; 2) с использованием стационарных зондов; 3) измерения при помощи оптико-волоконных измерителей температуры; 4) с применением тепломеров, 5) по динамике восстановления температуры в скважине после бурения или промывки.

Анализ методов и установок теплового каротажа показывает, что практически любые способы реализации теплового каротажа требуют теплового возбуждения фрагментов массива горной породы и скважинного флюида с регистрацией пространственно – временных вариаций температуры в скважине. Возникающие при этом сложные процессы тепломассопереноса в скважинах и массивах горных пород создают серьезные проблемы для достижения необходимого качества измерений, не решенные удовлетворительно до настоящего времени. В связи с этим можно сделать вывод о том, что ни один из предложенных способов теплового каротажа не обеспечивает в совокупности выполнения следующих необходимых требований:

- 1) возможность одновременных измерений комплекса тепловых свойств пород – теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости;
- 2) точность измерений не хуже 10 % для теплопроводности и 15% для температуропроводности (при доверительной вероятности 0,95);

- 3) достаточно высокая производительность для получения данных о пространственных вариациях тепловых свойств в пределах месторождения;
- 4) универсальность зондов применительно к работе в разнообразных скважинных условиях;
- 5) приемлемый радиус влияния зонда (глубинность исследований), исключающий искажающее влияние глинистой корки, обсадной колонны, зоны проникновения промывочной жидкости и механических изменений в породах околоскважинного пространства;
- 6) достаточная защищенность от помех вследствие искажающего влияния конвекции флюида в скважине и нестабильности теплового сопротивления на участке поверхность зонда – стенки скважины.

Несмотря на наличие многочисленных разработок в области лабораторных измерений тепловых свойств горных пород, современная аппаратно-методическая база теплофизических исследований пока не может обеспечить требуемое качество экспериментальной информации о тепловых свойствах пород *in-situ*. В связи с этим наиболее надежным способом получения информации о тепловых свойствах пород являются лабораторные измерения на керне.

Лабораторные исследования тепловых свойств нефтенасыщенных образцов коллекторов предъявляют ряд следующих специальных требований:

- отсутствие жестких требований к форме, размерам изучаемых образцов горных пород и качеству обработки их поверхности;
- необходимость неразрушающих бесконтактных измерений, обеспечивающих сохранность керна и исключающих влияние теплового контактного сопротивления на измерения;
- высокая производительность измерений;
- регистрация вариаций теплопроводности и температуропроводности в пределах каждого образца;
- возможность измерений локальных значений теплопроводности;
- анализ тепловой анизотропии пород.

Для проведения массовых измерений тепловых свойств керна был выбран метод оптического сканирования, который отвечает всем вышеприведенным требованиям.

Из анализа литературных данных следует, что в настоящее время для проведения прецизионных измерений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) горных пород в наибольшей степени подходит модифицированный кварцевый дилатометр, разработанный в НИЛ Проблем геотермии РГГРУ. Данный дилатометр характеризуется прецизионным уровнем измерений ТКЛР на образцах горных пород, обеспечивает измерения ТКЛР на образцах стандартного керна и исследования анизотропии ТКЛР на одном образце, а также позволяет определять зависимость ТКЛР от температуры с шагом не менее 20 °С.

Показана необходимость получения надежных данных о теплопроводности пластовых флюидов, таких как вода, нефть, буровой раствор и керосин (керосин часто используется в петрофизических исследованиях в качестве модели легких нефтей). Важность информации о теплопроводности этих флюидов определяется тем, что поронасыщающие флюиды в значительной мере определяют теплопроводность пористых и трещиноватых флюидонасыщенных сред. Показаны современные проблемы получения экспериментальных данных о теплопроводности флюидов, связанные с отсутствием надежных баз данных и серьезными недостатками существующих методов и средств измерений этого параметра. Среди методов измерений теплопроводности флюидов большое распространение получил так называемый метод горячей проволоки или линейного источника. Суть метода заключается в нагреве изучаемого флюида измерительным зондом, который имеет форму протяженного прямолинейного цилиндрического нагревателя, и регистрации изменения его температуры во времени. Однако свободная тепловая конвекция, возникающая при нагреве флюидов, резко ухудшает возможности точных измерений теплопроводности, так как характер теплообмена перестает быть кондуктивным и температурное поле характеризуется сложной гидродинамической структурой течений флюида, что делает неприемлемым определение теплопроводности флюида на основе чисто кондуктивной теоретической модели, положенной в основу метода измерений. В работе обосновывается необходимость разработки более совершенных, по сравнению со стандартными приборами, средств измерений теплопроводности нефти, пластовой воды, бурового раствора.

В связи с актуальностью применения теоретического моделирования теплопроводности нефтенасыщенных пород для прогноза данного параметра и интерпретации экспериментальных данных в работе рассматриваются возможности современных моделей. Особое внимание уделяется возможности применения простых инженерных теоретических моделей. Среди таких моделей наиболее распространенной является теоретическая модель Лихтенеккера и ее более совершенная модификация, предложенная Асаадом. В этой модификации в модель вводится корректирующий коэффициент, зависящий как от литотипа изучаемой породы, так и от вида поронасыщающего флюида. Однако значения корректирующего коэффициента Асаада для горных пород в литературе описаны только для воздушно-сухих и водонасыщенных пород. Определение корректирующих коэффициентов теоретической модели Лихтенеккера-Асаада для нефтенасыщенных пород, анализ закономерностей его вариаций и связи коэффициента с геометрическими характеристиками порового пространства могут дать принципиально новые возможности для оценки эффективной теплопроводности нефтенасыщенных пород-коллекторов и интерпретации получаемых экспериментальных данных.

Глава 2. В данной главе описываются результаты теплофизических экспериментальных исследований двух коллекций (I и II) горных пород, отобранных

из отдельных скважин одного из месторождений вязкой нефти. Породы представлены в основном кварцевыми песчаниками.

Исследования включали в себя следующие этапы:

- массовые измерения теплопроводности (λ), температуропроводности (a) и объемной теплоемкости ($C\rho$) пород на керне при насыщении пород моделью пластовой воды, тяжелой нефтью, керосином, который использовался в качестве модели слабовязкой нефти, этиленгликолем и в воздушно-сухом состоянии, что соответствует заполнению порового пространства паром;
- измерения температурного коэффициента линейного расширения пород;
- измерения пористости, проницаемости и скорости распространения продольных упругих волн;
- изучение корреляций между тепловыми и другими физическими свойствами пород.

Насыщение керна керосином при лабораторных исследованиях тепловых свойств коллекторов применялось в целях моделирования насыщения пород слабовязкой нефтью, так как было установлено, что тепловые свойства керосина и легких нефтей весьма близки. Из результатов экспериментальных исследований нефтенасыщенных и керосинонасыщенных пород установлено, что теплопроводность образцов, насыщенных керосином, отличается от теплопроводности пород, насыщенных тяжелой нефтью, не более чем на 7%, для температуропроводности различие не превышает 18%, а отличие в объемной теплоемкости достигает 5%.

Насыщение 26 образцов этиленгликолем с проведением теплофизических измерений проводилось для анализа зависимости корректировочного коэффициента теоретической модели Лихтенеккера-Асаада от теплопроводности флюидов (Глава 4).

По результатам измерений тепловых свойств пород двух коллекций при разном флюиде в поровом пространстве (вода, тяжелая нефть, керосин, этиленгликоль и воздух) были установлены тесные корреляционные связи теплопроводности и объемной теплоемкости с пористостью (рис. 1 и 2), а также были оценены диапазоны вариаций и средние значения тепловых свойств при нормальных термобарических условиях (таблица 1). Полученные результаты свидетельствует о значительных изменениях теплопроводности и объемной теплоемкости кварцевых песчаников при замене флюида в порах, что происходит в процессе добычи тяжелых нефтей методами теплового воздействия на пласт.

По результатам измерений теплопроводности, только на 8 образцах коллекции I и на 8 образцах коллекции II установлена существенная тепловая анизотропия с коэффициентом анизотропии в диапазоне 1.2 - 2.7. Следовательно, можно сделать вывод, что все коллекции представлены горными породами, обладающими малой тепловой анизотропией.

Измерения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) проводились при помощи специальной аппаратуры, разработанной в РГГРУ.

Экспериментальные данные по ТКЛР были полученные для 60 воздушно-сухих образцов кварцевого песчаника из коллекций I и II. Изучавшийся диапазон температур составлял 25 – 100 °С. Нагрев образцов стандартного керна из слабоконсолидированных кварцевых песчаников до более высоких температур мог привести к существенной дезинтеграции образцов, что сделало бы недостоверными результаты последующих петрофизических и петрографических исследований. Из прежних исследований, проводившихся в НИЛ Проблем геотермии РГГРУ, установлено, что зависимость ТКЛР от температуры является в основном линейной. Данная закономерность позволила нам установить прогнозные зависимости ТКЛР для температур в диапазоне 100 - 170 °С (рис. 3 и 4), используя уравнения регрессии, установленные по экспериментальным данным в диапазоне температур 25 - 100 °С.

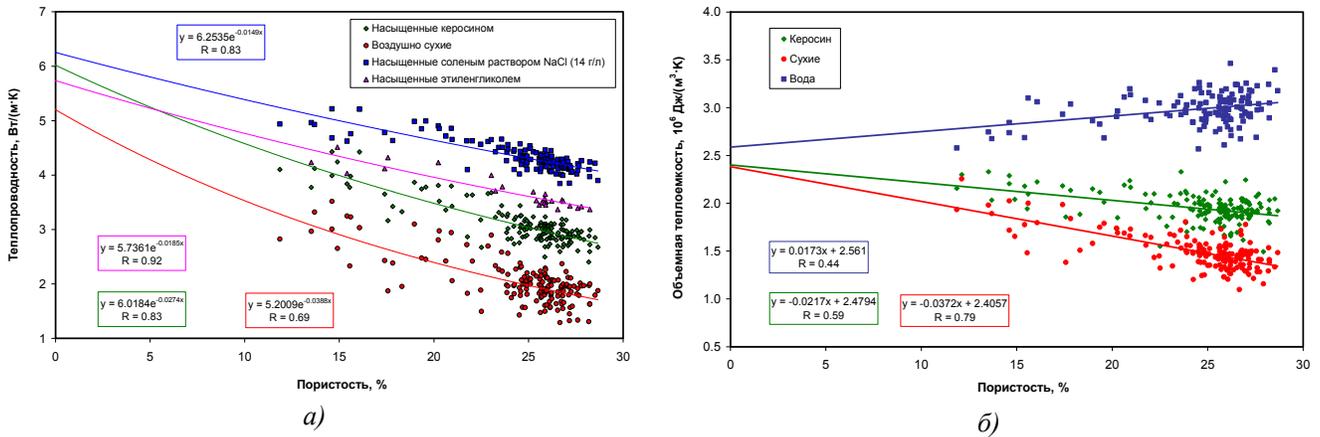


Рис. 1. Зависимости теплопроводности (а) и объемной теплоемкости (б) горных пород от пористости, установленные при измерениях на образцах коллекции I в сухом (красные точки), керосинонасыщенном (зеленые точки), в состояниях насыщения этиленгликолем (розовые точки) и соляным раствором (синие точки).

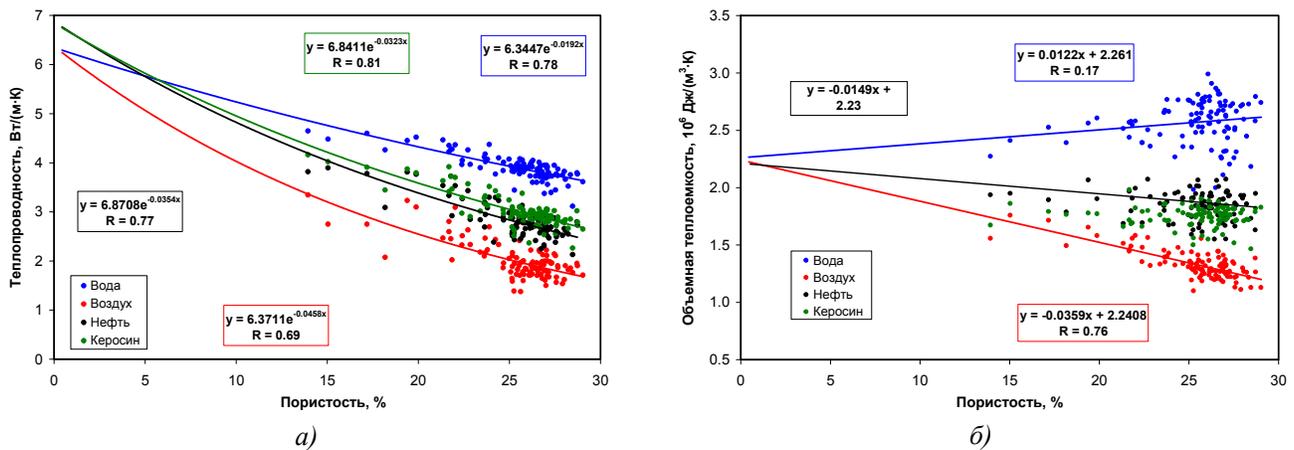


Рис. 2 Зависимости теплопроводности (а) и объемной теплоемкости (б) пород от пористости, установленные при измерениях на образцах керна коллекции II в сухом (красные точки), керосинонасыщенном (зеленые точки), нефтенасыщенном (черные точки) и водонасыщенном (синие точки) состояниях.

Таблица 1. Статистические данные о тепловых свойствах пород коллекций I и II.

Порода	Тепловые свойства									N
	Сухие и воздушно-сухие			Нефтенасыщенные (керосинонасыщенные)			Водонасыщенные			
	λ , Вт/(м·К)	a , 10^{-6} м ² /с	C_p , 10^6 Дж/(м ³ ·К)	λ , Вт/(м·К)	a , 10^{-6} м ² /с	C_p , 10^6 Дж/(м ³ ·К)	λ , Вт/(м·К)	a , 10^{-6} м ² /с	C_p , 10^6 Дж/(м ³ ·К)	
Песчаники кварцевые	<u>2,03 (0,44)*</u> 1,17-3,96	<u>1,42 (0,22)</u> 0,81-2,15	<u>1,43 (0,20)</u> 1,10-2,44	<u>3,01 (0,40)</u> 2,13-4,60	<u>1,60 (0,21)</u> 1,01-2,39	<u>1,89 (0,17)</u> 1,43-2,55	<u>4,16 (0,35)</u> 3,12-5,22	<u>1,49 (0,14)</u> 1,23-2,05	<u>2,80 (0,27)</u> 1,98-3,46	248
Песчаники лейкоксен- кварцевые	<u>2,10 (0,24)</u> 1,75-2,60	<u>1,41 (0,21)</u> 1,09-1,80	<u>1,50 (0,14)</u> 1,33-1,71	<u>3,03 (0,41)</u> 2,36-4,20	<u>1,59 (0,26)</u> 1,28-2,16	<u>1,91 (0,14)</u> 1,67-2,18	<u>4,28 (0,14)</u> 4,05-4,48	<u>1,44 (0,09)</u> 1,33-1,62	<u>2,98 (0,19)</u> 2,61-3,20	11
Алевролиты	<u>2,57 (0,84)</u> 0,89-3,46	<u>1,42 (0,36)</u> 0,62-1,71	<u>1,78 (0,33)</u> 1,39-2,27	<u>3,39 (0,35)</u> 2,73-3,94	<u>1,72 (0,32)</u> 1,07-2,18	<u>2,01 (0,29)</u> 1,71-2,56	<u>4,53 (0,32)</u> 3,89-4,76	<u>1,55 (0,10)</u> 1,43-1,71	<u>2,93 (0,18)</u> 2,72-3,13	10

* - $\frac{\text{Среднее(СКО)}}{(\text{Минимальное} - \text{Максимальное})}$, СКО – среднеквадратичное отклонение.

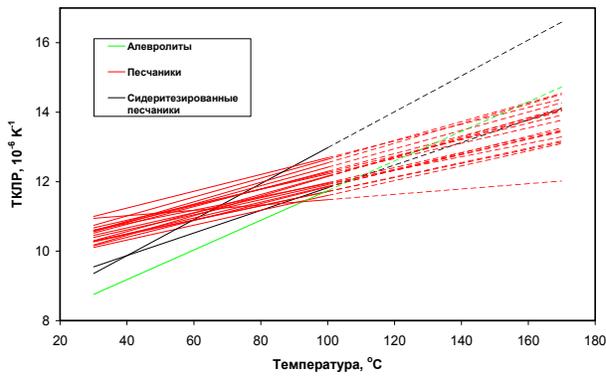


Рис. 3. Экспериментальные данные по ТКЛР, полученные для 30 образцов в сухом состоянии из коллекции I.

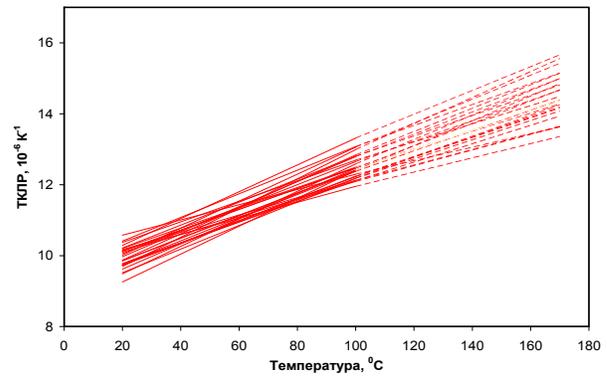


Рис. 4. Экспериментальные данные по ТКЛР, полученные для 30 образцов в сухом состоянии из коллекции II.

Контрольные эксперименты в диапазоне температур 25 – 180 °С показывают, что линейная зависимость наблюдается и в данном случае, что обеспечивает определение ТКЛР для температур вплоть до 180 °С с систематической погрешностью не более 8% по результатам измерений в диапазоне температур 25 - 100 °С. Результаты оценки вариаций экспериментальных данных о ТКЛР при температурах 30, 90 и 170 °С представлены в таблице 2.

Таблица 2. Диапазоны вариаций значений ТКЛР при разных температурах для образцов коллекций I и II.

Образцы	Температура, °С		
	30	90	170
Коллекция I	$(10,1 - 11,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$(11,5 - 12,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$(13,0 - 14,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}*$
Коллекция II	$(9,3 - 10,6) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$(11,8 - 12,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$(13,4 - 15,1) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}*$

* - прогнозные значения.

При помощи измерительной установки УК-10 ПМС на образцах керна из коллекции II проведены измерения скорости продольных волн (V_p) при нормальных условиях (частота акустического сигнала 100 кГц). Измерения проводились

последовательно на образцах в четырех состояниях флюидонасыщения: нефтенасыщенном, сухом, водонасыщенном и керосинонасыщенном.

Коэффициент корреляции между скоростью продольных волн V_p и пористостью составил 0,69, 0,65, 0,64 и 0,66 соответственно для пород с воздухом, водой, керосином и тяжелой нефтью в порах.

По результатам комплексных измерений скоростей V_p одних и тех же образцов стандартного керна в различном состоянии флюидонасыщения установлена тесная корреляционная связь между теплопроводностью (λ) и скоростью продольных волн (V_p) (рис. 5). Установленные уравнения регрессии связи теплопроводности и скорости продольных упругих волн пород-коллекторов при насыщении различными флюидами при нормальных условиях имеют следующий вид:

- вода в порах $\lambda = 2,752 \cdot e^{0,0001V_p}$ Вт/(м·К), коэффициент корреляции $R = 0,71$;
- тяжелая нефть $\lambda = 1,127 \cdot e^{0,0003V_p}$, $R = 0,91$;
- керосин $\lambda = 1,727 \cdot e^{0,0002V_p}$ Вт/(м·К), $R = 0,83$;
- воздух $\lambda = 0,960 \cdot e^{0,0004V_p}$ Вт/(м·К), $R = 0,85$.

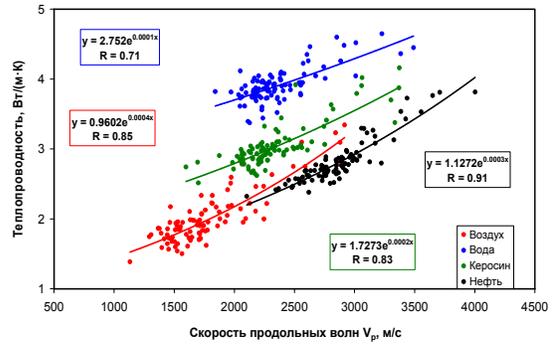


Рис. 5. Поле корреляции теплопроводности и скорости продольных упругих волн V_p , в сухом (красные точки), керосинонасыщенном (зеленые точки), нефтенасыщенном (черные точки) и водонасыщенном (синие точки) состояниях.

Установлена достаточно тесная корреляционная связь между теплопроводностью и температуропроводностью при различном флюидонасыщении для образцов двух исследованных коллекций (рис. 6 и 7).

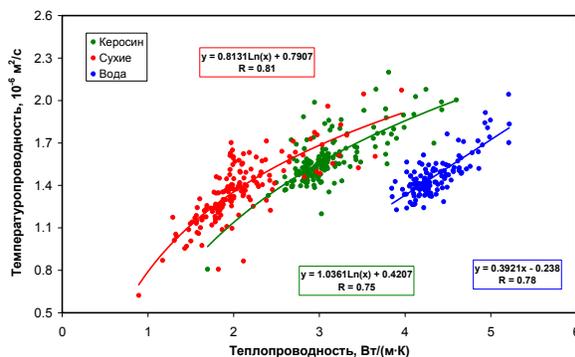


Рис. 6. Зависимости температуропроводности пород (а) от теплопроводности (λ) (коллекция I) в сухом (красные точки), керосинонасыщенном (зеленые точки) и водонасыщенном (синие точки) состояниях.

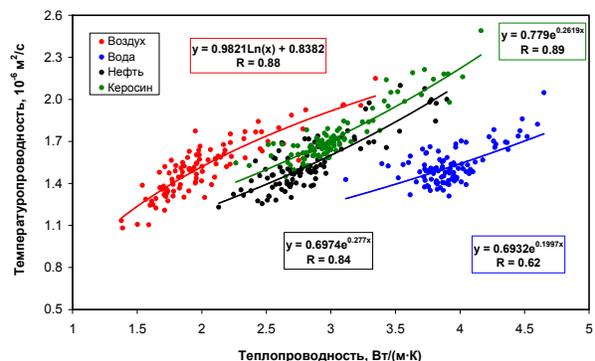


Рис. 7. Зависимости температуропроводности пород от теплопроводности (коллекция II) в сухом (красные точки), керосинонасыщенном (зеленые точки), нефтенасыщенном (черные точки) и водонасыщенном (синие точки) состояниях.

На рис. 8 и 9 показаны поля корреляций между составляющей тензора теплопроводности $\lambda_{||}$, параллельной плоскости слоистости, и проницаемостью пород по газу. В таблице 3 отображены уравнения и коэффициенты корреляций связи между этими параметрами.

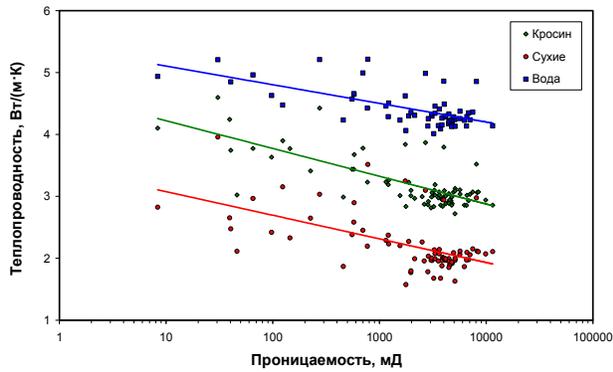


Рис. 8. Поля корреляций между теплопроводностью и проницаемостью по газу для образцов коллекции I.

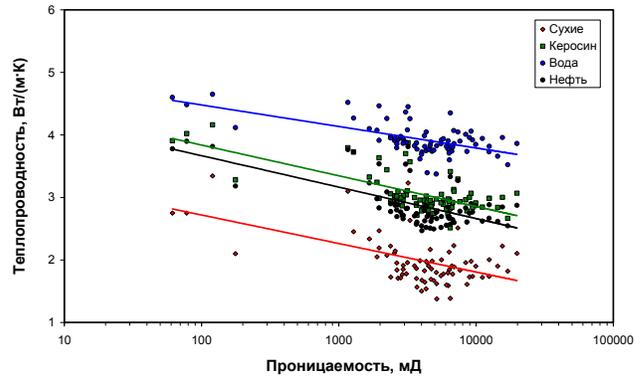


Рис. 9. Поля корреляций между теплопроводностью и проницаемостью по газу для образцов коллекции II.

Таблица 3. Уравнения и коэффициенты корреляций связи теплопроводности ($\lambda_{||}$) и проницаемости (Pr) по газу для образцов коллекции I и II.

Состояние флюидонасыщения	$\lambda_{ } = f(Pr)$	Коллекция I	Коллекция II
Сухие образцы	Уравнение	$\lambda = -0,166 \ln(Pr) + 3,459$	$\lambda = -0,198 \ln(Pr) + 3,631$
	Коэффициент корреляции	0,57	0,50
Керосинонасыщенные образцы	Уравнение	$\lambda = -0,195 \ln(Pr) + 4,671$	$\lambda = -0,213 \ln(Pr) + 4,820$
	Коэффициент корреляции	0,72	0,68
Нефтенасыщенные образцы	Уравнение	-	$\lambda = -0,218 \ln(Pr) + 4,674$
	Коэффициент корреляции	-	0,65
Водонасыщенные образцы	Уравнение	$\lambda = -0,131 \ln(Pr) + 5,406$	$\lambda = -0,149 \ln(Pr) + 5,167$
	Коэффициент корреляции	0,65	0,62

Глава 3 посвящена разработке аппаратурно-методической базы для измерений теплопроводности пластовых флюидов. Данные о теплопроводности пластовых флюидов необходимы при оценке параметров теплового режима, при моделировании процессов тепло- и массопереноса в скважине и околоскважинном пространстве, прогнозе и анализе вариаций эффективной теплопроводности пород-коллекторов, оптимизации тепловых методов добычи вязких нефтей и в некоторых других случаях. Работа была направлена на создание экспериментального подхода к измерениям, при котором было бы пренебрежимо малым влияние конвекции флюида, возникающей при нагреве флюида, на результаты измерений.

В связи с этим выполнен комплекс исследований, направленных на разработку аппаратурно-методической базы для измерений теплопроводности различных флюидов, свободной от указанного недостатка. Эти работы включали в себя:

- создание теоретических и экспериментальных основ методики измерений и разработку измерительного прибора с исключением влияния тепловой конвекции на результаты измерений теплопроводности флюида;

- анализ погрешностей измерений и метрологическое тестирование разработанного прибора;
- сравнение качества измерений теплопроводности разработанным прибором и имеющимся стандартным прибором «KD-2 Pro».

В результате этих исследований был создан прибор, обеспечивающий получение надежной, прецизионного уровня информации о теплопроводности нефтей, керосина и бурового раствора при различных температурах. Разработанный прибор позволил изучать пространственно-временные вариации теплопроводности цементного раствора во время гидратации и высыхания.

В основу теоретической модели прибора положен метод измерения теплопроводности горных пород, основанный на применении линейного источника тепла. Разработанный прибор включает в себя измерительную ячейку, которая представляет собой игольчатый зонд (рис. 10), внутри которого расположен U-образный платиновый нагреватель диаметром 0,1 мм. К проводнику припаяны два потенциальных отвода диаметром 0,05 мм. Пустотное пространство в зонде заполнено теплопроводящей пастой с теплопроводностью $\lambda = 0,62 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (при температуре 25 °С). Диаметр зонда равен 0,8 мм, его длина составляет 50 мм. Таким образом, обеспечивается выполнение условия $\frac{L}{d} \geq 30$, необходимого для применимости теории линейного источника к линейному нагревателю данного типа (Blackwell et al., 1954).

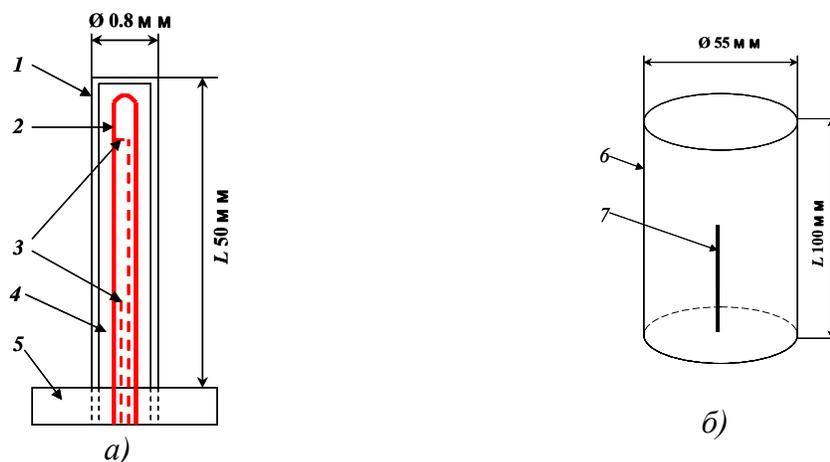


Рис. 10. Схема измерительного зонда (а) и ячейки для измерений теплопроводности (б): 1 – корпус зонда, 2 – платиновый нагреватель, 3 – потенциальные отводы, 4 – теплопроводящая паста, заполняющая пустотное пространство, 5 – разъем крепления сигнальных проводов, 6 – цилиндрическая измерительная ячейка, 7 – установленный в измерительную ячейку зонд для измерений теплопроводности жидкости.

В процессе измерений регистрируют зависимость температуры от времени, а для определения теплопроводности выбирают участок зависимости $T(t)$, характеризующийся линейной зависимостью температуры от логарифма времени, соответствующей теоретической модели метода линейного источника (рис. 11). Разработанная методика обеспечивает измерения теплопроводности флюидов лишь в пределах интервала времени $[t_1, t_2]$, в течение которого остается справедливой

зависимость $T \sim \lg(t)$. Таким образом, исключается погрешность измерений, вызванные конвекцией флюида.

Специальные эксперименты по изучению влияния естественной конвекции на измерения теплопроводности при двух положениях измерительного зонда, вертикальном и горизонтальном, позволили установить существенные ограничения на ориентацию зонда при измерениях на флюидах с низкой вязкостью. Показано, что существенные преимущества обеспечиваются при вертикальной ориентации зонда.

Для оценки систематической и случайной погрешностей измерений теплопроводности флюидов разработанным нами прибором и определения зависимости этих погрешностей от температуры флюида проведено метрологическое тестирование прибора. В качестве стандартных образцов теплопроводности флюидов, для которых по литературным источникам и данным Национального института стандартов США хорошо известны значения теплопроводности при различных температурах, применялись дистиллированная вода и глицерин. По результатам измерений теплопроводности воды в температурном диапазоне от 5 до 85 °С и глицерина от 5 до 160 °С определены основные технические характеристики прибора, которые приведены в таблице 4.

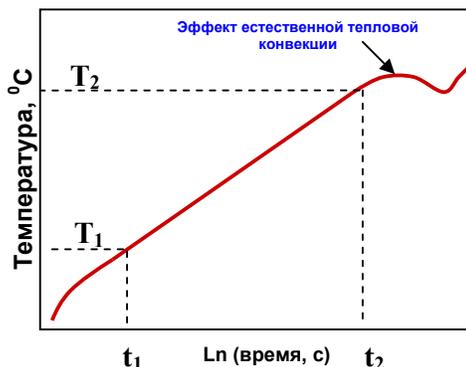


Рис. 11. Типичная зависимость температуры линейного источника от логарифма времени нагрева с участком, соответствующим искажающему влиянию свободной тепловой конвекции на формирование температуры линейного источника при измерениях теплопроводности флюида.

Таблица 4. Технические характеристики разработанного прибора для измерений теплопроводности флюидов.

Температурный диапазон измерений	0 - 160 °С
Диапазон измерений теплопроводности	0,1 – 0,7 Вт/(м·К)
Случайная погрешность измерений (при доверительной вероятности 0.95)	± 3,5%
Систематическая погрешность измерений	менее ± 5%
Полная погрешность измерений теплопроводности (при доверительной вероятности 0.95)	не более ± 6%
Нижняя граница диапазона вязкости изучаемых флюидов	$3 \cdot 10^{-4}$ Па·с

Сравнение результатов метрологического тестирования разработанной аппаратуры и стандартного промышленного прибора KD-2 Pro в широком температурном диапазоне показало, что систематические погрешности измерений прибором KD-2 теплопроводности слабовязких жидкостей недопустимо велики (вплоть до 75%), в то время как разработанный прибор свободен от этого серьезного недостатка.

При помощи разработанного прибора были проведены измерения теплопроводности керосина марки КО-20, трех видов нефтей, включая вязкую (тяжелую) нефть, и бурового раствора на водной основе в широком температурном диапазоне.

Результаты измерений теплопроводности нефтей представлены на рис. 12 в виде абсолютных измеренных значений λ_T и относительных изменений $\delta\lambda$, которые рассчитаны по формуле $\delta\lambda = \frac{\lambda_T}{\lambda_0}$, где λ_T – теплопроводность нефти при данной температуре, λ_0 – теплопроводность нефти при начальной температуре, близкой к 0 °С.

Зависимости $\delta\lambda$ от температуры для изучавшихся образцов нефтей представлены на рис. 13. Как видно из рисунка, относительные изменения теплопроводности хорошо согласуются друг с другом и могут быть описаны одной полиномиальной зависимостью вида: $\delta\lambda = 4,017 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 2,327 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,997$.

Результаты измерений теплопроводности бурового раствора, основанного на воде, в температурном диапазоне до ~90 °С в сравнении с температурной зависимостью теплопроводности воды показали, что теплопроводность бурового раствора систематически превышает теплопроводность воды во всем температурном диапазоне на 17%.

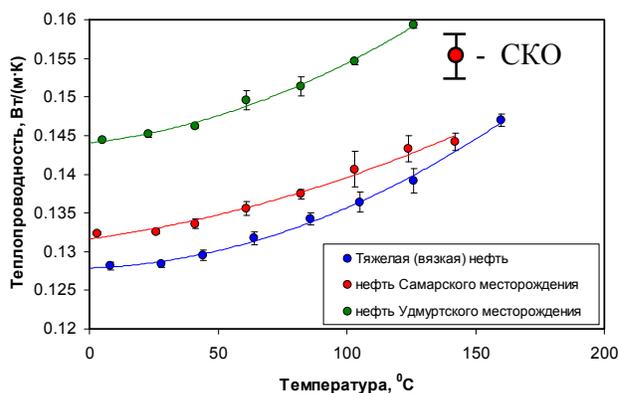


Рис. 12. Экспериментальные данные о зависимости теплопроводности вязкой нефти, нефтей Самарского и Удмуртского месторождений в зависимости от температуры. СКО – среднеквадратичное отклонение.

С использованием разработанной аппаратуры были проведены экспериментальные исследования влияния процентного содержания воды в нефти на эффективную теплопроводность. Проведено сравнение результатов исследований с результатами моделирования эффективной теплопроводности водосодержащей нефти на основе разных теоретических моделей.

Изучение пространственно-временных вариаций теплопроводности цементного раствора в процессе гидратации и при последующем высушивании осуществляли на образце с размерами 60×60×60 мм. Измерения начинали через 30 мин после завершения перемешивания порошка цемента с водой и продолжали в процессе застывания и высыхания образца с интервалом 30 мин в течение первых 60 часов с

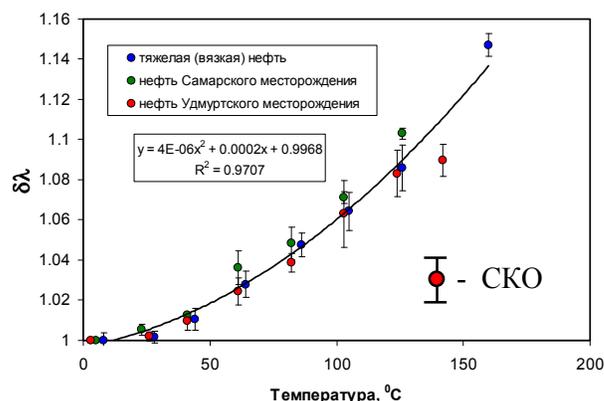


Рис. 13. Относительное изменение теплопроводности вязкой нефти, нефтей Самарского и Удмуртского месторождений в зависимости от температуры. СКО – среднеквадратичное отклонение.

завершением измерений через одну неделю после изготовления образца. Измерительный зонд устанавливался в горизонтальном положении в центре образца. Контрольные измерения теплопроводности образца на установке оптического сканирования (с измерениями на всех гранях и последующем усреднении результатов) проводились через 48 и 60 часов, а также через 7 дней после замешивания образца цемента.

Экспериментальные данные о теплопроводности образца цемента в процессе гидратации и высыхании представлены на рис. 14. Из этих данных видно, что через 48 часов после замешивания образца значения эффективной теплопроводности, измеренные установкой оптического сканирования и новым прибором, весьма близки и составляют 1,64 и 1,66 Вт/(м·К) соответственно. Измерения теплопроводности

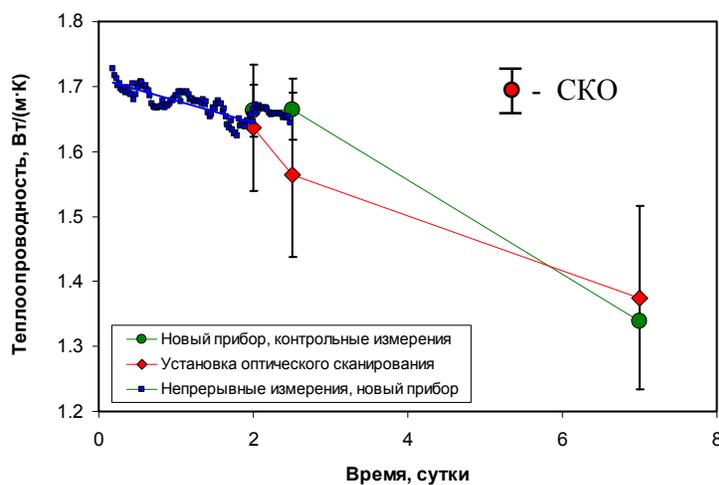


Рис. 14. Сопоставление результатов измерений теплопроводности образца цемента измеренной новым прибором и методом оптического сканирования в различные моменты времени. СКО – среднеквадратичное отклонение.

цемента двумя приборами через 60 часов после замешивания показывают существенное расхождение: 1,56 Вт/(м·К) для установки оптического сканирования и 1,67 Вт/(м·К) для разработанного прибора. Такое расхождение результатов можно объяснить наиболее интенсивным и быстрым высыханием образца в приповерхностных участках (глубиной 1-1,5 см), в то время как в центре образца, на глубине 2,5-5 см, через 60 часов еще сохраняется остаточная вода. Измерения теплопроводности цемента, проведенные через 7 суток после замешивания, вновь показали весьма близкие результаты: 1,38 и 1,34 Вт/(м·К) соответственно для установки оптического сканирования и разработанного нами прибора. Отсюда следует, что через 7 суток исследуемый образец цемента имеет однородную структуру при теплопроводности материала, установленной при помощи установки оптического сканирования и разработанного прибора.

Глава 4 посвящена результатам исследований по расширению применимости широко известной теоретической модели Лихтенеккера в целях прогноза теплопроводности пород, насыщенных пластовыми флюидами, и интерпретации экспериментальных данных теплофизических исследований. Для этого изучена возможность введения в модель корректировочного коэффициента, предложенного Асаадом. Результаты включают в себя определение требований к точности определения параметров модели Лихтенеккера-Асаада, оценку корректировочного коэффициента

этой модели по данным экспериментальных исследований, анализ связи корректировочного коэффициента с геометрическими характеристиками порового пространства, описание созданной методики прогноза теплопроводности нефтенасыщенных пород на основе теоретической модели Лихтенеккера-Асаада.

Базовое уравнение Лихтенеккера для эффективной теплопроводности неоднородной двухкомпонентной среды, которая в нашем случае представляет собой композицию «минеральный скелет - порозаполняющий флюид», имеет вид:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_M^{1-\Phi} \cdot \lambda_{флюид}^{\Phi}, \quad (1)$$

где $\lambda_{эфф}$ – эффективное значение теплопроводности горной породы, λ_M – теплопроводность минерального скелета, $\lambda_{флюид}$ - теплопроводность порозаполняющего флюида и Φ - пористость.

Из уравнения (1) следует:

$$\log \frac{\lambda_{нас}}{\lambda_{сухая}} = \Phi \cdot \log \frac{\lambda_{флюид}}{\lambda_{воздух}} \quad \text{или} \quad \log(\delta\lambda) = \Phi \cdot \log \frac{\lambda_{флюид}}{\lambda_{воздух}} \quad (2)$$

где $\lambda_{нас}$ – теплопроводность флюидонасыщенной породы, $\lambda_{сухая}$ – теплопроводность сухой породы, $\lambda_{флюид}$ - теплопроводность порозаполняющего флюида, $\lambda_{воздух}$ - теплопроводность воздуха, а $\delta\lambda = \lambda_{нас}/\lambda_{сухая}$.

Как следует из уравнения (2), зависимость между параметром $\delta\lambda$ и Φ в полулогарифмическом масштабе должна быть линейной. В работе Brigaud и Vasseur (1989) было показано, что корреляция между параметром $\log(\lambda_{нас}/\lambda_{сухая})$, установленным экспериментально, и пористостью Φ для пористых пород описывается линейным уравнением регрессии, и данное соответствие характеризовалось как общий случай для осадочных пород. Однако наши сопоставления результатов экспериментальных исследований тепловых свойств осадочных пород различных нефтегазовых месторождений с результатами теоретических расчетов показали, что соответствие данных, описанное Brigaud и Vasseur (1989), наблюдается только для коллекций Самотлорского и Таллиннского месторождений нефти, которые представлены чистыми песчаниками, которые изучались также и в работе Brigaud и Vasseur (1989). Во всех других случаях наблюдается значительное расхождение экспериментально установленных линий регрессии и теоретической зависимости.

В работе Brigaud и Vasseur (1989) было показано, что для описания теплопроводности осадочных пород теоретическая модель Лихтенеккера не может обеспечить удовлетворительный результат, и было предложено использовать теоретическую модель Лихтенеккера-Асаада, которая имеет вид:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_M^{1-f \cdot \Phi} \cdot \lambda_{флюид}^{f \cdot \Phi} \quad (3)$$

где f – корректировочный коэффициент, который в основном зависит от структуры порового пространства и который до последнего времени был определен лишь для некоторых типов сухих осадочных пород.

Нами проведена оценка влияния неопределенности данных о теплопроводности

матрицы и погрешностей измерений эффективной теплопроводности и пористости образцов на неопределенность определения корректировочного коэффициента f по результатам измерений теплопроводности на образцах пород. Для повышения надежности прогноза теплопроводности коллекторов на основе теоретической модели Лихтенеккера-Асаада оценено влияние степени неопределенности в значениях коэффициента f , теплопроводности минерального скелета и пористости на точность оценок эффективной теплопроводности.

Проведенные расчеты позволили установить зависимость относительной неопределенности δf от параметров λ_M и λ_{eff} при различном флюидонасыщении. Зависимость между δf и относительной погрешности в определении теплопроводности матрицы $\delta\lambda_m$, полученная при различных значениях эффективной теплопроводности и значении теплопроводности матрицы равной $\lambda_m = 3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, представлена на рис. 15.

В работе установлена взаимосвязь корректировочного коэффициента f теоретической модели Лихтенеккера-Асаада с геометрическими характеристиками порового пространства, а именно – средним аспектным отношением пор/трещин в модели эффективной теплопроводности многокомпонентной среды, основанной на теории эффективных сред (Тертычный В.В., дисс. на соискание степени к.ф.-м.н., 2002; Вауик, 2002).

В результате построены 3D – поверхности, отображающие связь коэффициента f с пористостью и аспектным отношением пор/трещин этой теоретической модели, на основании которых можно сделать вывод о том, что значения корректировочного коэффициента f теоретической модели Лихтенеккера-Асаада зависят от:

- типа заполняющего поровое пространство флюида, а точнее от его значений теплопроводности;
- геометрии порового пространства (чем меньше аспектное отношение пор/трещин, тем больше значение коэффициента f);
- теплопроводности минерального скелета горной породы.

По экспериментальным данным о теплопроводности кварцевых песчаников коллекций I и II при их насыщении разными флюидами, по известным значениям пористости и теплопроводности матрицы были рассчитаны значения корректировочного коэффициента f теоретической модели Лихтенеккера-Асаада. На основании того, что две изучавшиеся коллекции кварцевых песчаников принадлежат

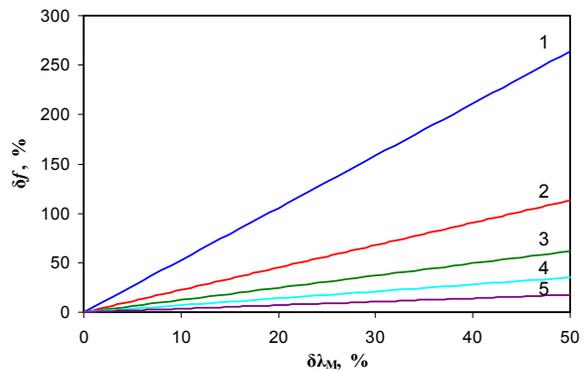


Рис. 15. Зависимость относительной ошибки определения коэффициента f от относительной ошибки в определении теплопроводности матрицы при $\lambda_{эфф}$: 1 – 2,5 Вт/(м·К); 2 – 2,0 Вт/(м·К); 3 – 1,5 Вт/(м·К); 4 – 1,0 Вт/(м·К); 5 – 0,5 Вт/(м·К), $\lambda_{флюид} = 0,024 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

одному литотипу и по результатам петрографического анализа имеют одинаковую структуру эти две коллекции были объединены. Значения корректировочного коэффициента определялись исходя из средней теплопроводности минерального скелета, определенной из общих уравнений регрессии при экстраполяции в область с нулевой пористостью.

По результатам расчетов были определены средние значения коэффициента f для каждого состояния флюидонасыщения и определена зависимость корректирующего коэффициента от теплопроводности порозаполняющего флюида. Статистические данные о результатах определения корректирующего коэффициента f для образцов коллекций при заполнении порового пространства разными флюидами приведены в таблице 5.

Таблица 5. Статистические данные о значениях корректирующего коэффициента f , рассчитанных для образцов коллекций I и II при насыщении пород различными флюидами.

Керн	Насыщение				
	Сухие образцы	Керосин	Нефть	Этиленгликоль	Вода
Коллекция I и II	$\frac{0,77 (0,11) *}{(0,50 - 1,14)}$	$\frac{0,63 (0,08)}{(0,37 - 0,94)}$	$\frac{0,75 (0,11)}{(0,50 - 1,12)}$	$\frac{0,57 (0,06)}{(0,45 - 0,69)}$	$\frac{0,55 (0,12)}{(0,19 - 1,04)}$
Кол-во образцов	260	261	93	26	230

* - $\frac{\text{Среднее(СКО)}}{(\text{Минимальное} - \text{Максимальное})}$, СКО – среднеквадратичное отклонение.

По результатам исследований разработана методика прогноза теплопроводности пористых кварцевых песчаников, основанная на теоретической модели Лихтенеккера-Асаада и экспериментальных данных о теплопроводности керн в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях, Методика прогноза включает в себя четыре основных стадий:

Стадия I: Измерения теплопроводности коллекции керн в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях;

Стадия II: Построение корреляционных связей теплопроводности исследуемых коллекций керн от пористости в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. Определение теплопроводности минерального скелета горных пород по установленным уравнениям регрессии;

Стадия III: Оценка средних значений коэффициентов f для воздушно-сухих и водонасыщенных образцов исследуемого керн. Оценка значений коэффициента f для флюида с заданной теплопроводностью из ранее полученных зависимостей;

Стадия IV: Расчет эффективной теплопроводности керн, насыщенного заданным флюидом при помощи теоретической модели Лихтенеккера-Асаада.

Разработанная методика была протестирована на двух коллекциях образцов керн кварцевых песчаников, рассмотренных в Главе II. Относительное расхождение

между прогнозными и экспериментально установленными значениями теплопроводности флюидонасыщенных образцов коллекций I и II в среднем составляет 9% для образцов в керосинонасыщенном состоянии и 3,6% для образцов в нефтенасыщенном состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе прецизионных измерений теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости и коэффициента тепловой анизотропии, выполненных для 267 образцов кварцевых песчаников при насыщении их тяжелой нефтью, водой, керосином (как моделью легкой нефти) и воздухом, сформирована представительная база данных о тепловых свойствах флюидонасыщенных терригенных коллекторов, представленных в основном кварцевыми песчаниками.
2. Из анализа результатов измерений комплекса тепловых свойств нефтенасыщенных образцов пород, представляющих собой терригенные коллектора (в основном кварцевые песчаники), установлены тесные корреляционные связи и уравнения регрессии связи тепловых свойств пород с емкостными, фильтрационными свойствами и взаимные корреляционные связи тепловых свойств при разных порозаполняющих флюидах.
3. Измерения скоростей продольных волн и тепловых свойств для исследованных коллекций кварцевых песчаников, насыщенных нефтью и другими флюидами, позволили установить тесные корреляционные связи тепловых свойств с акустическими и емкостными свойствами терригенных коллекторов данного типа.
4. На основе массовых измерений температурного коэффициента линейного расширения кварцевых песчаников установлено, что диапазон вариаций температурного коэффициента линейного расширения при температуре 20-30 °С составляет $(9,3 - 11,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а при температуре 170 °С $(13,0 - 15,1) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
5. Разработана и метрологически изучена аппаратно-методическая база для измерений теплопроводности флюидов, насыщающих коллектора, в температурном диапазоне от 0 до 160 °С и при нижней границе диапазона вязкости изучаемых флюидов $3 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Влияние естественной тепловой конвекции, возникающей при измерениях теплопроводности флюидов созданным прибором, контролируется и исключается из результатов измерений.
6. При помощи разработанного прибора проведены измерения теплопроводности нефтей различных месторождений, бурового раствора на водной основе и керосина КО-20 (используемого в качестве модели легкой нефти при петротепловых исследованиях) в температурном диапазоне 2...160°С.
7. Комбинация измерений теплопроводности разработанным прибором и методом оптического сканирования позволила контролировать тепловые свойства

цемента и устанавливать пространственно-временные вариации тепловых свойств цемента в процессе его застывания и высыхания.

8. Аналитическим путем установлено влияние погрешностей при определении различных исходных параметров теоретической модели Лихтенеккера-Асаада на точность определения корректирующего коэффициента модели и прогноза эффективной теплопроводности для терригенных коллекторов, представленных кварцевыми песчаниками,
9. Экспериментально установлены значения корректирующего коэффициента теоретической модели Лихтенеккера-Асаада для терригенных коллекторов (кварцевых песчаников) при заполнении порового пространства различными флюидами. Установлена зависимость этого коэффициента от теплопроводности порозаполняющих флюидов и разработана методика оценки теплопроводности нефтенасыщенных терригенных коллекторов на основе рассмотренной модели, основанная на экспериментальных данных о теплопроводности пород в сухом и водонасыщенном состояниях.

Публикации по теме диссертации

1. Новиков С.В., Попов Ю.А., Тертычный В.В., Шако В.В., Пименов В.П. Возможности и проблемы современного теплового каротажа. Изв. Вузов, Геология и разведка, 2008, № 3, с. 54-58.
2. Новиков С.В., Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Тарелко Н.Ф., Татаринов В.Ю. Прибор для измерений теплопроводности флюидов и результаты его применения. Изв. Вузов, Геология и разведка, 2009, № 2, с. 56-60.
3. Новиков С.В., Колбенков А.В., Вертоградский В.А., Миклашевский Д.Е. Теплопроводность осадочных пород в зависимости от термобарических условий их залегания. Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов “Геофизика-2003”, Санкт-Петербург, 2003, с. 134-136.
4. Вертоградский В.А., Попов Ю.А., Новиков С.В. Зависимость теплопроводности высокопористых флюидонасыщенных известняка и песчаника от давления. Сб. тезисов докладов VI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», 2003. т.3, М., 2003, с. 133.
5. Миклашевский Д.Е., Вертоградский В.А., Коробков Д.А., Попов Ю.А., Новиков С.В. Теплопроводность монокристаллического кварца при высоких давлениях. Сб. тезисов докладов VII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», 2005, 3, с. 177.
6. Вертоградский В.А., Попов Ю.А., Миклашевский Д.Е., Коробков Д.А., Лазаренко А.П., Новиков С.В. Установка для измерения теплопроводности горных пород при высокой температуре, поровом и двухкомпонентном внешнем давлении. Сб.

тезисов докладов VII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», 2005, 3, с. 174.

7. Новиков С.В., Баюк И.О., Шако В.В., Попов Ю.А. Использование нелинейной оптимизации при определении тепловых свойств пород методом линейного источника. Сборник трудов «Молодые - наукам о земле», М., РГГРУ, 2006, с. 104.

8. Новиков С.В., Шако В.В., Баюк И.О., Попов Ю.А. Определение комплекса тепловых свойств горных пород методом линейного источника. Сборник докладов «Всероссийской конференции-конкурса студентов выпускного курса ВУЗов минерально-сырьевого комплекса России», Санкт-Петербург, 2006, с.49-50.

9. Горобцов Д.Н., Коробков Д.А., Новиков С.В. Тепловые свойства пород разреза Ен-Яхинской сверхглубокой скважины. Сб. тезисов докладов VIII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», М.: 2007, 6, с. 347-350.

10. Новиков С.В., Типенко Г.С., Шако В.В. Особенности теплопереноса в модели скважины при теплофизических измерениях с применением линейного источника тепла. Сб. тезисов докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле», М., РГГРУ, 2008, с. 281

11. Новиков С.В., Шако В.В., Черепанов А.О., Гаинцев А.Ю. Экспериментальная модель теплопереноса в скважинах при измерениях тепловых свойств массива. Сб. тезисов докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле», М., РГГРУ, 2008, с. 282

12. Новиков С.В., Попов Ю.А., Тертычный В.В., Шако В.В., Пименов В.П. Современные тенденции развития теплового каротажа. Сборник научных трудов «Тепловое поле Земли и методы его изучения», М., Изд. РИО РГГРУ, 2008 с.160-166.

13. Новиков С.В., Татаринев В.Ю. Прибор для определения теплопроводности флюидов и результаты измерений. Сборник докладов X юбилейной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2009», Ухта, УГТУ, 2009, с.178 – 182.

14. Новиков С.В., Богданов Е.Д., Горобцов Д.Н. Повышение эффективности теоретической модели Лихтенеккера-Асаада и ее применение для прогноза теплопроводности нефте- и керосинонасыщенных образцов кварцевых песчаников. Сборник докладов X юбилейной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2009», Ухта, УГТУ, 2009, с. 174-178.

15. Новиков С.В., Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Богданов Е.Д. Изучение структуры порового пространства кварцевых песчаников по их тепловым свойствам. Сб. тезисов докладов IX международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», 2009, т.2, с.223.

16. Новиков С.В., Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Татаринев В.Ю. Прибор для измерений теплопроводности жидкостей. Сб. тезисов докладов IX международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», 2009, т.2, с.224.