

На правах рукописи

ТАРЕЛКО НИКОЛАЙ ФЕДОРОВИЧ

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ ТЯЖЕЛЫХ
НЕФТЕЙ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕПЛОВЫМ МЕТОДАМ ДОБЫЧИ**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва

2011

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, в.н.с.
Владимир Михайлович Боровков (ВНИИФТРИ)
кандидат физико-математических наук, с.н.с.
Владимир Георгиевич Попов (МГУ)

Ведущая организация: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Защита состоится 07.07.2011 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском государственном геологоразведочном университете 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, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, РГГРУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.121.07.

Автореферат разослан 6 июня 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физико-математических
наук, проф.



А.Д. Каринский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Изучение тепловых свойств пород при термобарических условиях естественного залегания относится к числу наиболее важных задач петрофизики и геотермии, являясь необходимым этапом в решении ряда фундаментальных и прикладных проблем исследования недр.

Экспериментальные данные по теплопроводности (λ), температуропроводности (a) и объемной теплоемкости (c_p) необходимы при расчленении разреза, определении плотности глубинного теплового потока, интерпретации результатов термокаротажа, прогнозе температуры на подзбойные глубины, теоретическом моделировании процессов тепло- и массопереноса в горном массиве. Особенно важную роль играет получение экспериментальной информации о комплексе тепловых свойств коллекторов и вмещающих пород при проектировании и оптимизации методов добычи вязкой нефти с тепловым воздействием на продуктивный пласт.

Надежная аппаратурно-методическая база для измерений тепловых свойств пород непосредственно в скважине, в настоящее время практически отсутствует. Поэтому исследование этих свойств возможно, в основном, лишь в лабораторных условиях при помощи специальных измерительных установок, позволяющих моделировать реальные термобарические условия залегания пород.

Однако достигнутый в настоящее время уровень лабораторных измерений крайне редко обеспечивает определение тепловых свойств пород при одновременном воздействии температуры, порового и двухкомпонентного (вертикального и бокового) литостатического давления с учетом тепловой анизотропии свойств на представительных по размеру образцах пород и минералов.

До недавнего времени практически отсутствовала возможность проведения такого рода измерений на слабоконсолидированных и рыхлых образцах пород, а тепловые свойства именно таких пород чаще всего необходимы при проектировании и оптимизации методов добычи тяжелой нефти. В свете выше сказанного, становится очевидной необходимость повышения точности и увеличения функциональности аппаратуры для измерений тепловых свойств пород при пластовых термобарических условиях. Это возможно только на основе модернизации существующих измерительных комплексов и создания новых, более современных лабораторных установок.

При отсутствии в литературе достаточно полных данных о тепловых свойствах минералов и горных пород при пластовых давлениях и температурах важным является проведение систематических метрологических испытаний измерительных приборов и получение более представительной экспериментальной информации о тепловых свойствах горных массивов.

Цель работы

Целью работы является создание аппаратурно-методического комплекса для повышения качества экспериментальной информации о тепловых свойствах пород при пластовых термобарических условиях и получение достоверных данных о тепловых свойствах резервуаров и вмещающих пород месторождений тяжелых нефтей.

Основные задачи исследований

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

1. Развитие и совершенствование аппаратурно-методического комплекса для измерений главных значений тензоров теплопроводности и температуропроводности минералов и консолидированных горных пород при совместном влиянии температуры, порового и двух компонент (вертикальной и горизонтальной) литостатического давления в диапазоне температур 10...300 °С и давлений 0,1...250 МПа.

2. Разработка новой аппаратурно-методической базы для проведения измерений теплопроводности образцов рыхлых горных пород при совместном воздействии повышенных давления и температуры.

3. Метрологическое изучение аппаратурно-методического комплекса, разработанного для измерений теплопроводности и температуропроводности минералов и горных пород при пластовых температурах и давлениях.

4. Получение представительных экспериментальных данных о тепловых свойствах консолидированных пород месторождений тяжелых нефтей при пластовых термобарических условиях при помощи разработанной аппаратурно-методической базы.

5. Получение представительных экспериментальных данных о теплопроводности рыхлых пород, характерных для месторождений тяжелых нефтей, при пластовых термобарических условиях и разном флюидонасыщении (нефть, вода, воздух) при помощи новой аппаратурно-методической базы.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Найдены новые научно-технические решения для усовершенствования экспериментальной базы для измерений комплекса тепловых свойств консолидированных горных пород при пластовых температурах и давлениях.
2. Разработана аппаратура и методика измерений теплопроводности и прогноза температуропроводности неконсолидированных пород при совместном влиянии температуры и давления.
3. Проведен метрологический анализ разработанных приборов для измерений тепловых свойств пород при пластовых условиях, позволивший обеспечить метрологически обоснованные измерения тепловых свойств пород в расширенном диапазоне температуры до 180°C.
4. На основе измерений, проведенных при помощи разработанной аппаратуры, получены новые представительные данные о теплопроводности рыхлых горных пород месторождений тяжелых нефтей в широком диапазоне температур при фиксированном значении пластового давления.
5. На основе разработанной экспериментальной базы для различных месторождений тяжелых нефтей получены представительные данные о тепловых свойствах консолидированных пород-коллекторов и вмещающих пород при пластовых термобарических условиях.
6. Разработаны методики для прогноза вариаций теплопроводности нефте- и водонасыщенных образцов месторождения тяжелых нефтей в зависимости от температуры по данным о пористости и тепловых свойствах, измеренных при нормальных условиях.

Защищаемые научные положения

1. Созданный аппаратурно-методический комплекс обеспечивает измерения главных значений тензоров теплопроводности и температуропроводности консолидированных горных пород при одновременном воздействии температуры в диапазоне 10...250 °С и давления в диапазоне 0,1...250 МПа с отдельным регулированием порового и двух компонент горного давления с возможностью автоматического регулирования и поддержания давления и температуры.
2. Разработанная аппаратурно-методическая база для измерений теплопроводности рыхлых пород обеспечивает повышение качества

экспериментальной информации о тепловых свойствах коллекторов и вмещающих горных пород, необходимой для моделирования термогидродинамических процессов, происходящих в пласте и в скважине во время эксплуатации месторождений тяжелых нефтей.

3. Экспериментальные данные о тепловых свойствах пород месторождений тяжелых нефтей, полученные при измерениях с учетом влияния пластовых термобарических условий на образцах пород двух месторождений тяжелых нефтей с учетом насыщения пород тяжелой нефтью и другими порозаполняющими флюидами, значительно расширяют базу данных по тепловым свойствам коллекторов и вмещающих пород, помогают осуществить прогноз вариаций тепловых свойств в процессе разработки месторождений тяжелых нефтей тепловыми методами.

Личный вклад автора состоит в следующем

1. Активное участие в усовершенствовании измерительной установки для измерения тепловых свойств пород при одновременном воздействии температуры и трех компонент давления.
2. Активное участие в создании установки для измерений тепловых свойств консолидированных пород при одновременном воздействии температуры, порового и всестороннего давления.
3. Активное участие в создании аппаратурно-методической базы для измерений теплопроводности образцов рыхлых пород, как при нормальных, так и при пластовых термобарических условиях.
4. Проведение метрологического тестирования созданных измерительных установок.
5. Проведение комплексных измерений тепловых свойств пород при моделировании пластовых условий на образцах горных пород (консолидированных и рыхлых) с четырех месторождений тяжелых нефтей.
6. Обработка и интерпретация полученных экспериментальных данных.

Практическая значимость работы

Полученные данные о тепловых свойствах необходимы при расчленении разреза, определении плотности глубинного теплового потока, интерпретации результатов термокаротажа, прогнозе температуры на подзабойные глубины, теоретическом моделировании процессов тепло- и массопереноса в горном

массиве, проектировании и оптимизации методов добычи вязкой нефти с тепловым воздействием на продуктивный пласт.

Разработанная аппаратурно-методическая база и полученная при ее помощи экспериментальная информация о комплексе тепловых свойств пород месторождений тяжелых нефтей обеспечивают информацию о коллекторах и вмещающих породах, необходимую для проектирования и оптимизации методов добычи тяжелых нефтей с тепловым воздействием на пласт.

Полученные данные о тепловых свойствах пород месторождений тяжелых нефтей необходимы для моделирования термогидродинамических процессов, происходящих в пласте и в скважине во время эксплуатации месторождений тяжелых нефтей.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты диссертационных исследований использованы в Научно-исследовательской лаборатории Петрофизики Российского государственного геологоразведочного университета, а также в работе компаний ООО «Технологическая компания Шлюмберже», ООО «Лукойл», СК «ПетроАльянс». Результаты исследований использованы также в работах РГГРУ по грантам РФФИ 05-05-64879, 08-05-10095, 08-05-00977, 09-05-10083.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Международных конференциях "Новые идеи в науках о Земле" в Москве (2007, 2009, 2011 г.г.), X международной конференции "Тепловое поле Земли и методы его изучения" в Москве (2008 г.), научных конференциях «Молодые – наукам о Земле» в Москве (2008, 2010 г.г.), на юбилейной международной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2009» в Ухте (2009 г.), на VII Международной научно-практической конференции молодых специалистов «Геофизика–2009» в Санкт-Петербурге (2009 г.), Международной конференции "Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference" (Калгари, Канада, 2010 г.).

Публикации

Результаты работ отражены в 2 научных статьях в журнале «Геология и разведка», входящем в список рекомендованных ВАК, и 18 тезисах докладов, представленных на Международных научных конференциях.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 91 страниц машинописного текста, 63 рисунка, 13 таблиц и библиографию из 86 наименований.

Работа выполнена в научно-исследовательской Лаборатории петрофизики Института природопользования при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе.

Автор глубоко благодарен научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Ю.А. Попову 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 совершенствовании и наладке аппаратуры, признателен 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 и к.т.н. С.В. Новикову за помощь при разработке аппаратурно-методического комплекса для измерений тепловых свойств рыхлых образцов горных пород, Д.Н. Горобцову за помощь в проведении экспериментальных исследований тепловых свойств пород при нормальных термобарических условиях. Автор пользуется случаем поблагодарить всех сотрудников кафедры геофизики РГГРУ и НИЛ Петрофизики РГГРУ за внимание, помощь и ценные советы в ходе выполнения работы. Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам Московского исследовательского центра компании Шлюмберже 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 тепловых методов добычи тяжелых нефтей, изучены аспекты и роли исследования тепловых свойств коллекторов и вмещающих горных пород, проанализированы современные

возможности получения представительных данных о тепловых свойствах коллекторов и вмещающих горных пород месторождений тяжелых нефтей.

На основе анализа современного состояния данного вопроса охарактеризованы основные пути развития аппаратурно-методической базы для получения надежных данных о тепловых свойствах коллекторов и вмещающих пород месторождений тяжелых нефтей.

Проведен анализ современных методов добычи вязких нефтей с тепловым воздействием на продуктивный пласт. Показано, что современные тепловые методы добычи делятся на три группы: 1) внутрислоежное горение; 2) паротепловая обработка призабойных зон скважин (ПЗС); 3) закачка в пласт теплоносителей – пара или горячей воды.

Анализ тепловых методов добычи показывает, что несмотря на накопленный опыт в области тепловых методов воздействия на продуктивный пласт, для Российской нефтяной промышленности является крайне актуальным поиск и создание новых более совершенных технологий тепловой разработки месторождений высоковязких углеводородов.

Моделирование термогидродинамических процессов, происходящих в пласте и в скважине во время эксплуатации месторождений тяжелых нефтей, неосуществимо без данных о комплексе тепловых свойств коллекторов и вмещающих горных пород. Ввиду теплового воздействия на массив в процессе добычи высоковязких углеводородов необходимо при измерениях тепловых свойств учитывать влияние пластового давления и температуры, а также смену порозаполняющих флюидов.

Развитие новых тепловых методов, как и оптимизация существующих методов, требует глубокого понимания термогидродинамических процессов, происходящих в пласте и в скважине во время эксплуатации месторождений тяжелых нефтей.

В качестве одного из инновационных тепловых методов добычи рассмотрен метод парогравитационного дренажа (SAGD), который на сегодняшний день зарекомендовал себя в мире как один из наиболее эффективных способов добычи высоковязких углеводородов.

Проведен анализ современного состояния аппаратурно-методической базы для лабораторных измерений комплекса тепловых свойств нефте-, водо- и паросодержащих пород как при нормальных, так и при пластовых термобарических условиях.

Показан большой вклад в формирование базы данных по тепловым свойствам пород и пластовых флюидов таких исследователей как: Е.А.

Любимова, А.Н. Масленников, В.М. Добрынин, Б.П. Поршаков, Д.И. Дьяконов, С.А. Николаев и А.Н. Саламатин, В.Е. Зиновьев, И.Г. Коршунов, Г.И. Петрунин, В.Г. Попов, В.М. Эмиров, А.А. Курбанов, А.А. Липаев, Р.Г. Миннахметов, И.И. Маннанов, О.М. Мирсаетов, Р.Б. Абашеев, Ю.А. Попов, В.А. Вертоградский, Д.Е. Миклашевский, С.В. Новиков, С.А. Липаев.

Данные о тепловых свойствах позволяют детальней подойти к исследованию процессов тепломассопереноса в продуктивном пласте.

Выделены основные пути развития существующей аппаратурно-методической базы:

1. Расширение диапазона рабочих температур до 250 - 300 °С, поскольку именно такие температуры используются при разработке месторождений тяжелых нефтей методом паро-гравитационного дренажа.

2. Создание универсальных аппаратурно-методических комплексов, позволяющих проводить измерения тепловых свойств как консолидированных, так и рыхлых пород и пластовых флюидов с учетом влияния пластовых термобарических условий.

3. Расширение спектра петрофизических свойств одновременно изучаемых на одном аппаратурном комплексе, например объединение измерения тепловых и акустических свойств горных пород при пластовых термобарических условиях.

4. Повышение качества измерений тепловых свойств за счет систематической поверки измерительного оборудования, регулярного проведения метрологического тестирования аппаратурных комплексов.

5. Создание новых, более гибких, программных пакетов для моделирования процессов тепломассопереноса в пласте.

В **Главе 2** представлены результаты работ по совершенствованию ранее созданной аппаратурной базы, созданию новой установки для измерений тепловых свойств при моделировании пластовых термобарических условий, а также по разработке аппаратурно-методического комплекса для измерений теплопроводности образцов рыхлых пород при пластовых условиях.

Важную роль в обеспечении надежности теплофизических измерений при пластовых условиях играют метрологические исследования аппаратурно-методической базы, результаты которых также приведены в данной главе.

Усовершенствована установка для измерений тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости) консолидированных горных пород при пластовых термобарических (РТ) условиях. В ходе продолжительной эксплуатации установки были выявлены

недостатки конструкции, обусловленные, в первую очередь, длительным воздействием повышенных давления и температуры, для устранения которых были модифицированы следующие узлы экспериментальной установки:

- 1) электроизоляторы и втулка с электропроводами (рис. 1);
- 2) система охлаждения (рис. 2);
- 3) нагревательный элемент (рис. 3);
- 4) система уплотнений втулки с электропроводами (рис. 4);
- 5) гидравлическая система (рис. 5).

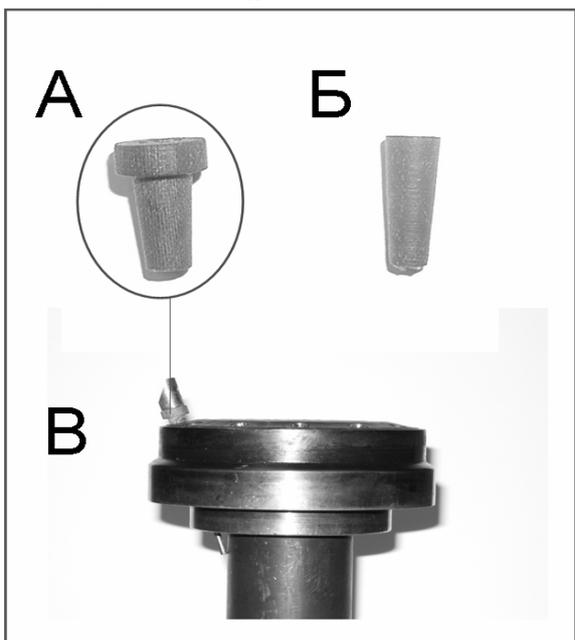


Рис. 1. Внешний вид электроизолятора: А – после его усовершенствования, Б – до усовершенствования, В – втулка с установленным, одним из двенадцати, электропроводом.



Рис. 2. Новая система охлаждения, 1 – рабочая камера с медной охлаждающей рубашкой, 2 – теплоизоляционный кофр, 3 – морозильная камера, 4 – термостат.

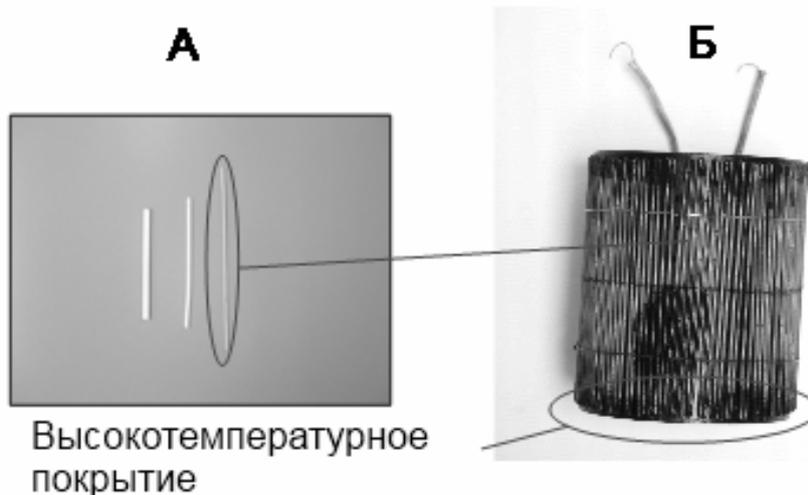


Рис. 3. Керамические трубки с оптимизированными геометрическими размерами (А), внутренний нагреватель образца с новым высокотемпературным покрытием (Б).

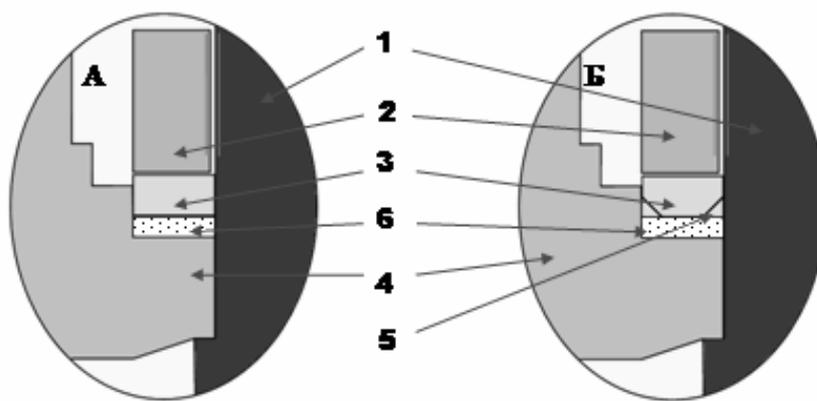


Рис. 4. Эскиз места уплотнения втулки с электровводами установки: А – до модификации, Б – после модификации (1 – корпус рабочей камеры, 2 – запорная гайка, 3 – уплотнительная шайба, 4 – втулка с электровводами, 5 – латунные уплотнительные кольца треугольного сечения, 6 – фторопластовое уплотнительное кольцо).



Рис. 5. Перепускной клапан, установленный в гидравлическую схему установки для поддержания постоянного уровня давления при варьирующейся температуре.

Усовершенствована методика подготовки образцов к измерениям при РТ условиях. При систематических измерениях были выявлены недостатки методики подготовки образцов, приводившие, в ряде случаев, к повреждению линейного источника и нарушению электрического контакта в измерительной цепи.

Для устранения выявленных недостатков было выполнено следующее:

- 1) разработана новая конструкция электровводов;
- 2) использован припой ПОС-180 с более высокой температурой плавления (180 °С);
- 3) использована фторопластовая лента, которая исключает попадание эпоксидной смолы на образец.

Разработана новая установка для измерений тепловых свойств консолидированных горных пород при совместном влиянии повышенных температуры, всестороннего и порового давлений (рис. 6).

Принцип измерений тепловых свойств разработанной установки основан на теоретических и экспериментальных моделях метода линейного источника тепла постоянной мощности.

Для оценки качества измерений проведено метрологическое исследование измерительной аппаратуры. Были измерены главные значения тензоров теплопроводности и температуропроводности на образце монокристаллического кварца при нормальной и повышенной температуре для каждого из пяти циклов нагрева и охлаждения (рис. 7).

Новые метрологические измерения позволили расширить верхний диапазон температуры, в котором метрологический анализ установки обеспечивает надежную оценку качества результатов измерений со 120 °С до 180 °С.



Рис. 6. Общий вид установки для измерений тепловых свойств консолидированных горных пород и руд при совместном влиянии повышенных температуры, всестороннего и порового давлений.

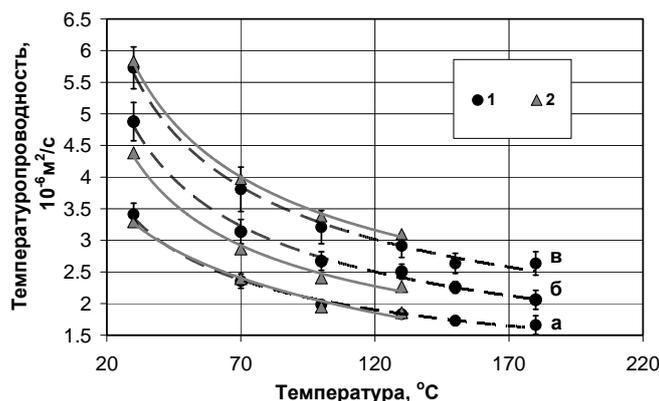
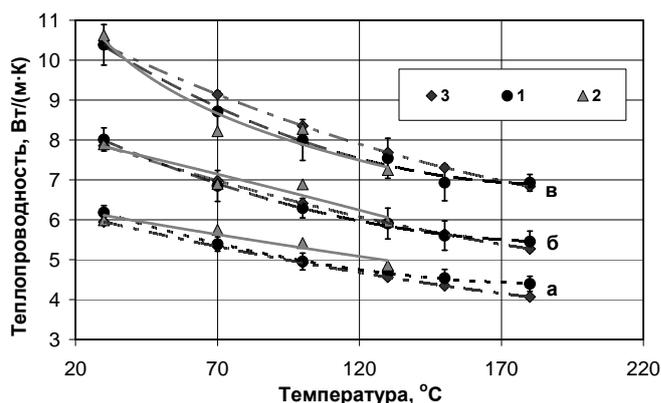


Рис. 7. Результаты метрологических исследований компонент тензора теплопроводности $\lambda_{a,b}$ (а), λ_{eff} (б) и λ_c (в): 1 – средние значения теплопроводности, рассчитанные по результатам измерений при пяти циклах; 2 – результаты измерений при предыдущих исследованиях; 3 – результаты исследований, опубликованных в литературе.

Для исследований тепловых свойств неконсолидированных, рыхлых образцов пород при одновременном воздействии повышенных давления и температуры разработаны специальная измерительная ячейка, состоящая из стального стакана, в дно которого вмонтирован изготовленный цилиндрический линейный зонд (рис. 8), и поршневая система передачи давления исследуемому образцу.

Оптимальная экспериментальная модель, обеспечивает измерения теплопроводности рыхлых пород при пластовых условиях в диапазонах дифференциального давления до 2,5 МПа и температуры от 25 до 180 °С.

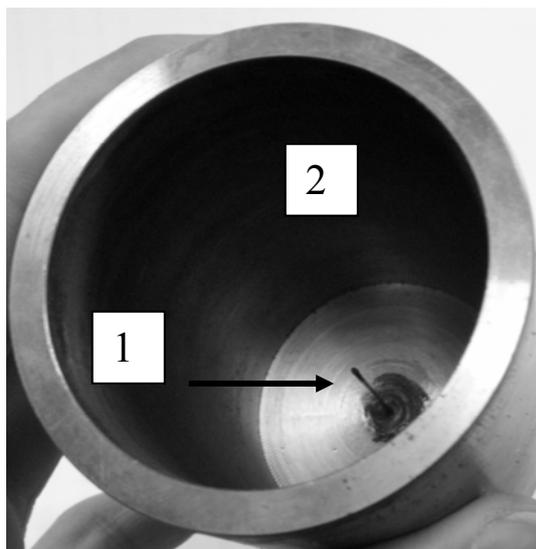


Рис. 8. Измерительная ячейка для исследований рыхлых пород с вмонтированным в дно линейным зондом: 1 – линейный зонд; 2 – стакан измерительной ячейки.

Для измерений тепловых свойств рыхлых, неконсолидированных пород был разработан специальный накладной датчик (рис. 9).



Рис. 9. Схема накладного датчика для измерений тепловых свойств рыхлых пород.

Теоретическая модель используемого метода измерений основана на принципе линейного источника тепла постоянной мощности.

Расчет теплопроводности производится при помощи широко известной формулы линейного источника:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2/t_1)}{T_2 - T_1}$$

где T_1 и T_2 – температуры нагревателя, измеряемые соответственно в моменты времени t_1 и t_2 , Q – удельная мощность линейного источника на единицу длины.

В данной экспериментальной реализации теоретической модели метода линейного источника главной неадекватностью является то, что нагреватель находится на границе двух сред с различными тепловыми свойствами, а не в однородной среде. Для учета систематической погрешности, обусловленной этой неадекватностью, были проведены две серии экспериментов на образцах с эталонными значениями теплопроводности в диапазоне от 0,701 до 8,04 Вт/(м·К).

В результате исследований установлена поправочная кривая, характеризующая зависимость систематической погрешности измерений теплопроводности накладным датчиком от измеренных значений теплопроводности изучаемых образцов (рис. 10), что обеспечивает возможность учета систематической погрешности и необходимый уровень

измерений теплопроводности неконсолидированных пород с применением накладного датчика.

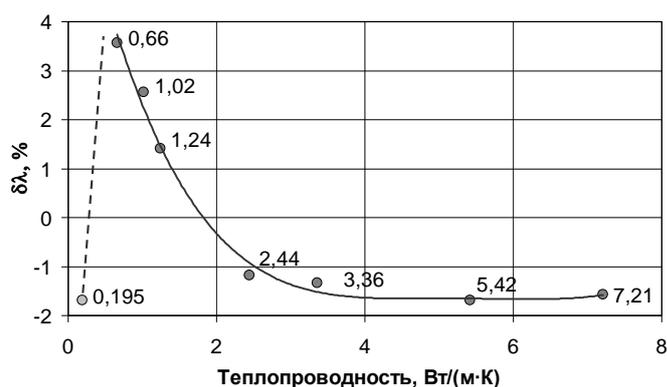


Рис. 10 Зависимость систематической погрешности измерений теплопроводности накладным датчиком от измеренных значений теплопроводности изучаемых образцов

позволяет проводить измерения тепловых свойств неконсолидированных пород, так как цели ее разработки и весь опыт ее использования в геолого-геофизических работах были связаны только с изучением консолидированных пород. Проведенная модификация установки оптического сканирования с целью ее адаптации для измерений тепловых свойств неконсолидированных пород включает следующие работы:

- 1) разработка ячейки для размещения изучаемых образцов пород;
- 2) изготовление специального блока питания для оптического источника энергии;
- 3) модернизация программного обеспечения установки оптического сканирования;
- 4) метрологическое тестирование модифицированной установки.

Проведены метрологические испытания модернизированной установки. В качестве стандартных образцов с низкими значениями теплопроводности при метрологических испытаниях использовались глицерин ($\lambda = 0,282$ Вт/(м·К)) и среднезернистый песок различной влажности с известными тепловыми свойствами ($\lambda = 0,25$ Вт/(м·К)). По результатам тестирования оцененная погрешность измерений теплопроводности составила $\pm 3\%$, температуропроводности $\pm 5\%$, объемной теплоемкости $\pm 6\%$.

При измерениях методом оптического сканирования для каждого образца регистрировали профили тепло- и температуропроводности, а также усредненные значения этих параметров.

В **Главе 3** описываются результаты теплофизических исследований консолидированных горных пород одного из месторождений вязкой нефти на

Разработана методика прогноза температуропроводности неконсолидированных пород при пластовых условиях с использованием данных, полученных для нормальных условий при помощи установки оптического сканирования.

Созданная ранее аппаратура оптического сканирования в своем классическом исполнении не

территории России. При разработке месторождения применяют тепловые методы добычи, что необходимо для увеличения коэффициента извлечения нефти.

Проведены комплексные измерения теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости на 22 образцах консолидированных пород при комнатных термобарических условиях ($T = 25$ °С, $P = 0,1$ МПа). Измерения тепловых свойств пород проводились методом оптического сканирования для трех состояний флюидонасыщения (естественное нефтенасыщение, 100% водонасыщение и сухое состояние) до и после РТ исследований. По результатам исследований установлены вариации изученных свойств в следующих диапазонах.

1. Для теплопроводности:

- а) в нефтенасыщенном состоянии $1,58...4,09$ Вт/(м·К);
- б) в сухом состоянии $1,24...2,82$ Вт/(м·К);
- в) в водонасыщенном состоянии $2,01...5,06$ Вт/(м·К).

2. Для температуропроводности:

- а) в нефтенасыщенном состоянии $(0,86...2,38) \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- б) в сухом состоянии $(0,70...1,93) \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- в) в водонасыщенном состоянии $(0,85...2,40) \cdot 10^{-6}$ м²/с.

3. Для объемной теплоемкости:

- а) в нефтенасыщенном состоянии $(1,61...2,21) \cdot 10^6$ Дж/(м³·К);
- б) в сухом состоянии $(1,12...2,28) \cdot 10^6$ Дж/(м³·К);
- в) в водонасыщенном состоянии $(2,11...3,23) \cdot 10^6$ Дж/(м³·К).

Установлена тесная корреляция ($R = 0,97$) теплопроводности, изученной на образцах в водонасыщенном состоянии с теплопроводностью тех же образцов в нефтенасыщенном состоянии.

Проведены исследования тепловых свойств горных пород при РТ условиях на 22 образцах горных пород в состоянии естественного флюидонасыщения и на 13 образцах в водонасыщенном состоянии (рис. 11).

Исследования проводились при пластовых дифференциальном давлении (P) и температуре (T), соответствующих условиям залегания отобранных образцов. Дифференциальное пластовое давление рассчитывалось по формуле $P = P_{гор} - P_{пл}$, где $P_{гор}$ – горное давление, рассчитанное как давление вышележащей толщи, $P_{пл}$ – пластовое давление.

Вариации экспериментальных значений тепловых свойств образцов при увеличении температуры от комнатной до 200°С приведены в таблице 1.

Таблица 1. Вариации тепловых свойств при переходе от комнатной к пластовой температуре.

Тепловые свойства	Среднее изменение, %	Минимальное изменение, %	Максимальное изменение, %
Нефтенасыщенные			
Теплопроводность	-28,2	-7,39	-48,1
Температуропроводность	-42,7	-25,4	-57,0
Объемная теплоемкость	28,1	6,2	62,4
Водонасыщенные			
Теплопроводность	-35,0	-7,34	-48,5
Температуропроводность	-47,6	-32,4	-56,4
Объемная теплоемкость	23,8	14,6	37,1

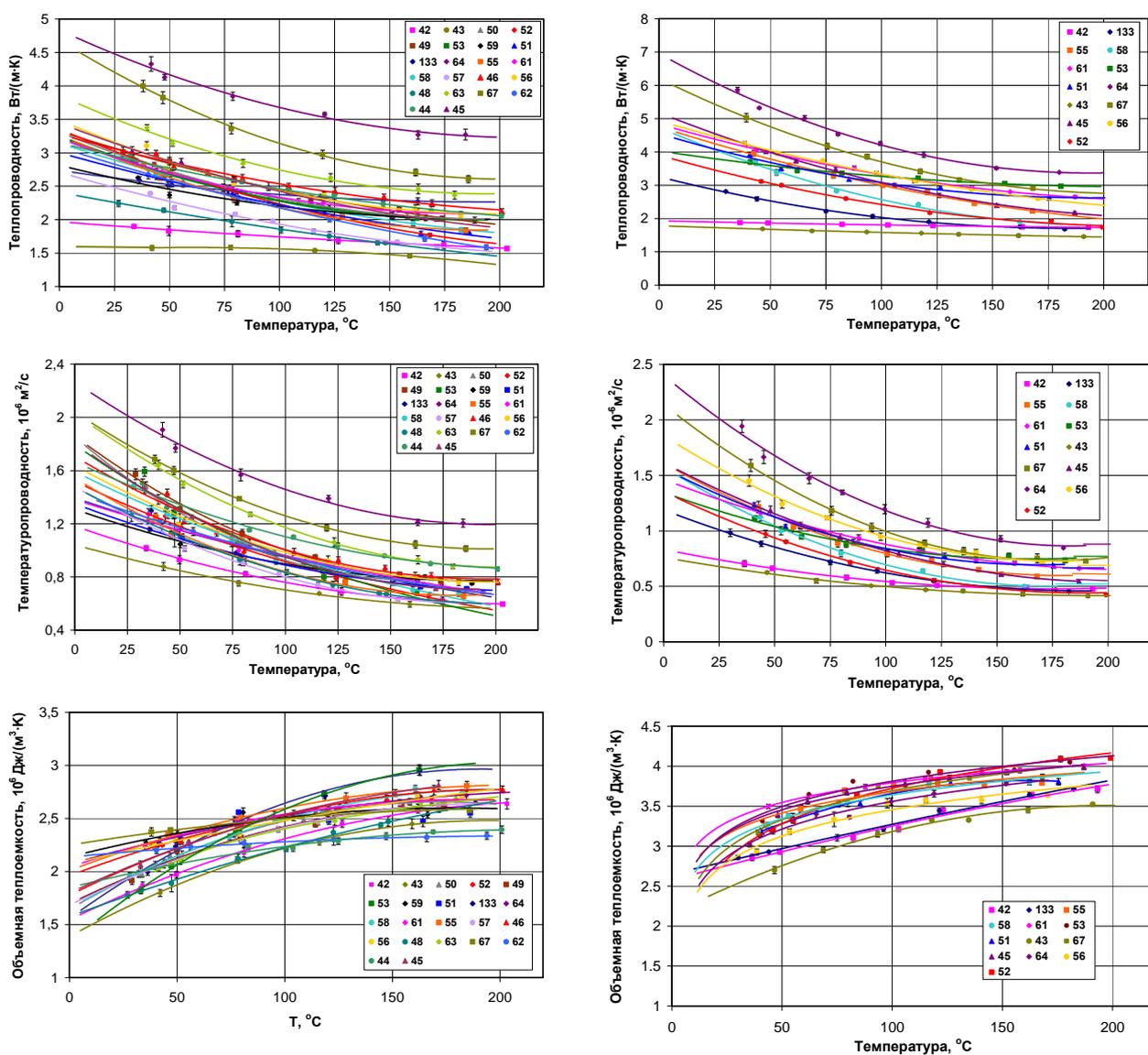


Рис. 11. Вариации теплопроводности температуропроводности и объемной теплоемкости образцов кварцевого песчаника (кроме образцов: 42- базальт, 43 – аргиллит, 67 –алевролит, 133 - сланец) при влиянии повышенной температуры и пластовом давлении (слева – нефтенасыщенные (кроме образцов 42,43,67,133), справа – водонасыщенные).

Установлено, что зависимости теплопроводности и температуропроводности от температуры для нефте- и водонасыщенных образцов наилучшим образом аппроксимируются уравнениями вида:

$$y(T) = A \cdot T^2 + B \cdot T + C.$$

Зависимости объемной теплоемкости для нефтенасыщенных образцов были также аппроксимированы уравнениями вида:

$$c\rho(T) = A \cdot T^2 + B \cdot T + C,$$

в то время как для водонасыщенных образцов более высокий коэффициент корреляции был получен при использовании уравнения вида:

$$c\rho(T) = D \cdot \ln(T) + E$$

Экстраполяция установленных аппроксимирующих зависимостей позволила осуществить расширение диапазона данных о тепловых свойствах для нижнего диапазона температур 5...25°C.

Анализ закономерностей в вариациях коэффициентов A , B и C в уравнении $\lambda(T) = A \cdot T^2 + B \cdot T + C$ для образцов в нефте- и водонасыщенном состояниях позволил установить зависимости этих коэффициентов от теплопроводности, измеренной при нормальных условиях. На базе этих зависимостей были разработаны три методики прогноза вариаций теплопроводности от температуры образцов в нефте- и водонасыщенном состояниях по данным, измеренным при нормальных условиях.

Для оценки степени изменения физических свойств пород после изучения их при пластовых термобарических условиях, проводили измерения пористости, плотности, тепловых свойств пород при нормальных условиях и анализ тонких шлифов пород до и после воздействия повышенной температуры и давления. По результатам таких измерений при помощи теории эффективных сред (ТЭС) проводилось теоретическое моделирование геометрии порово-трещиноватого пространства образцов до и после эксперимента при пластовых термобарических условиях (рис. 12).

Анализ полученных в результате теоретического моделирования данных показал, что после эксперимента при повышенных P T условиях уменьшается объемная концентрация тонких трещин с аспектным отношением от 10^{-5} до 10^{-3} . Также наблюдается уменьшение объемной концентрации сферических пор, и возрастает объемная концентрация пустот с аспектным отношением от 0,05 до 0,5. Аналогичные результаты для распределения объема пустот по их аспектным отношениям, до и после эксперимента при повышенных P T условиях, были получены и для всех исследованных образцов кварцевого песчаника месторождения, для которых пористость менялась от 22 до 27%.

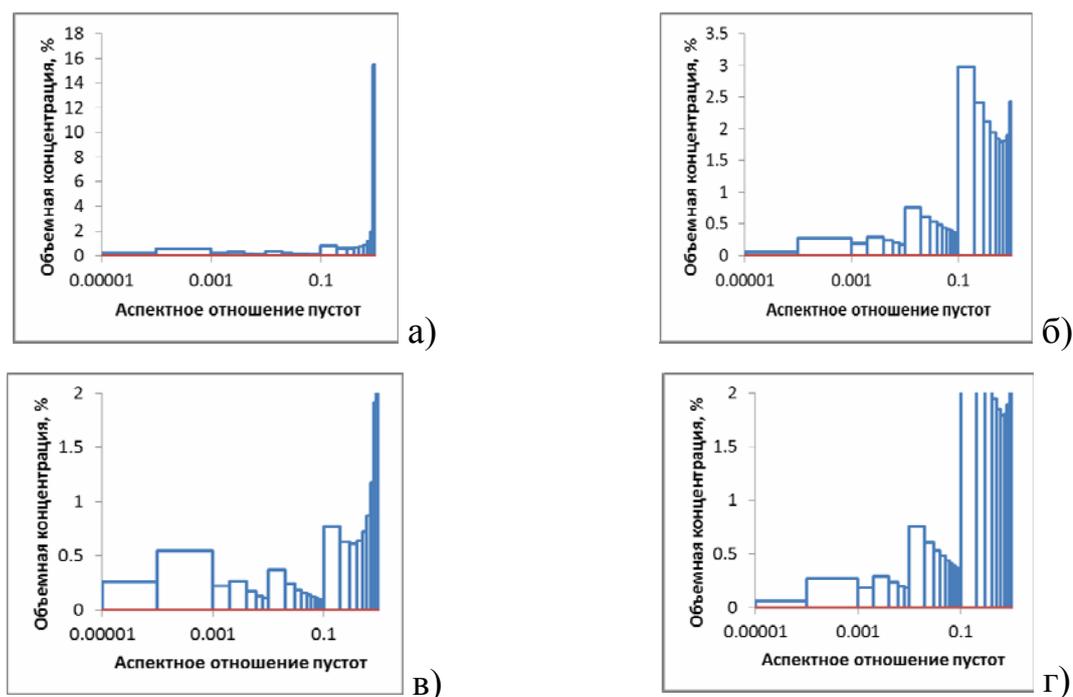


Рис. 12. Гистограммы распределения объема пустот по интервалам их аспектного отношения а) до эксперимента при повышенных РТ условиях и б) после него для образца № 50. Графики в) и г) показывают эти же гистограммы в укрупненном масштабе для улучшения визуализации содержания трещин. Синим цветом показана усредненная гистограмма всех приемлемых решений, красным цветом показано СКО.

В **Главе 4** описаны исследования тепловых свойств рыхлых пород одного из месторождений тяжелых нефтей, как при пластовых, так и при нормальных условиях.

При нормальных термобарических условиях методом оптического сканирования измерены 48 образцов, которые включают в себя образцы, отобранные для исследований при пластовых условиях. При моделировании пластовых термобарических условий проведены исследования тепловых свойств 22 образцов из двух скважин месторождения. При пластовых условиях образцы пород были изучены в трех состояниях флюидонасыщения.

В результате измерений при нормальных условиях установлено, что изучаемые породы характеризуются достаточно широкими диапазонами тепловых свойств:

- 1) для первой скважины $\lambda = 0,17... 1,48$ Вт/(м·К), $a = (0,10...0,58) 10^{-6}$ м²/с, $c_p = (1,60-2,74) 10^6$ Дж/(м³·К);
- 2) для второй скважины $\lambda = 0,27...1,74$ Вт/(м·К), $a = (0,16...0,62) 10^{-6}$ м²/с, $c_p = (1,69-2,98) 10^6$ Дж/(м³·К).

Согласно результатам измерений, минимальными значениями тепловых свойств характеризуются алевроглинистые породы. Максимальные значения тепловых свойств отмечаются у нефтенасыщенных средне- и

слабосцементированных песчаников. Следует отметить, что теплопроводность сцементированных глинистых алевролитов ($\lambda = 1,52 - 1,57$ Вт/(м·К)) в 9 раз выше, чем у неконсолидированных алеврито-глин ($\lambda = 0,17 - 0,18$ Вт/(м·К)). Теплопроводность нефтенасыщенных и слабонефтенасыщенных песчаников в среднем в 5 раз выше, чем у нефтенасыщенных и слабонефтенасыщенных песков.

Измерения теплопроводности при РТ условиях проводились при дифференциальном давлении и температуре, соответствующих условиям залегания отобранных образцов и условиям разработки тяжелых нефтей тепловыми методами (паро-гравитационный дренаж) в заданных интервалах глубин. Измерения теплопроводности в каждом из состояний флюидонасыщения проводили при четырех уровнях стабилизированной температуры: $T = 25, 75, 125$ и 150 °С. На рис. 12 представлены результаты экспериментальных исследований для 22 образцов в состоянии естественного нефтенасыщения, которые были отобраны из пластов I, II и III первой скважины и из пласта I второй скважины.

Из экспериментальных данных видно, что с ростом температуры происходит падение значений теплопроводности.

Для образцов из пласта I, скважины №1 теплопроводность уменьшается в среднем на 12% при максимальном и минимальном падении 19,3 и 7 % соответственно.

Для образцов из пластов II и III, скважины №1 теплопроводность уменьшается в среднем на 7 % при максимальном и минимальном падении 13 и 2 % соответственно.

Для образцов из пласта I, скважины №2 теплопроводность уменьшается в среднем на 9,2 % при максимальном и минимальном падении 15 и 4 % соответственно.

По результатам аппроксимации экспериментальных данных регрессионной зависимостью вида $y = a \cdot T^b$ был выполнен прогноз результатов в области пониженных и повышенных температур до 5 °С и 250 °С, соответственно. Прогнозные данные в диапазоне температур 5 до 250 °С, полученные по результатам экстраполяции, представлены на рисунках пунктирными линиями.

Разработана методика оценки вариаций объемной теплоемкости. Вместе с тем, надежность получаемых при таком подходе данных для температурных вариаций объемной теплоемкости может уступать другим экспериментальным

данном, в связи с некоторым различием в типах слабоконсолидированных песчаников и рыхлых песков.

Результаты применения данной процедуры для пород пластов I, II и III скважины №1 и пласта I скважины №2 представлены на рис. 13.

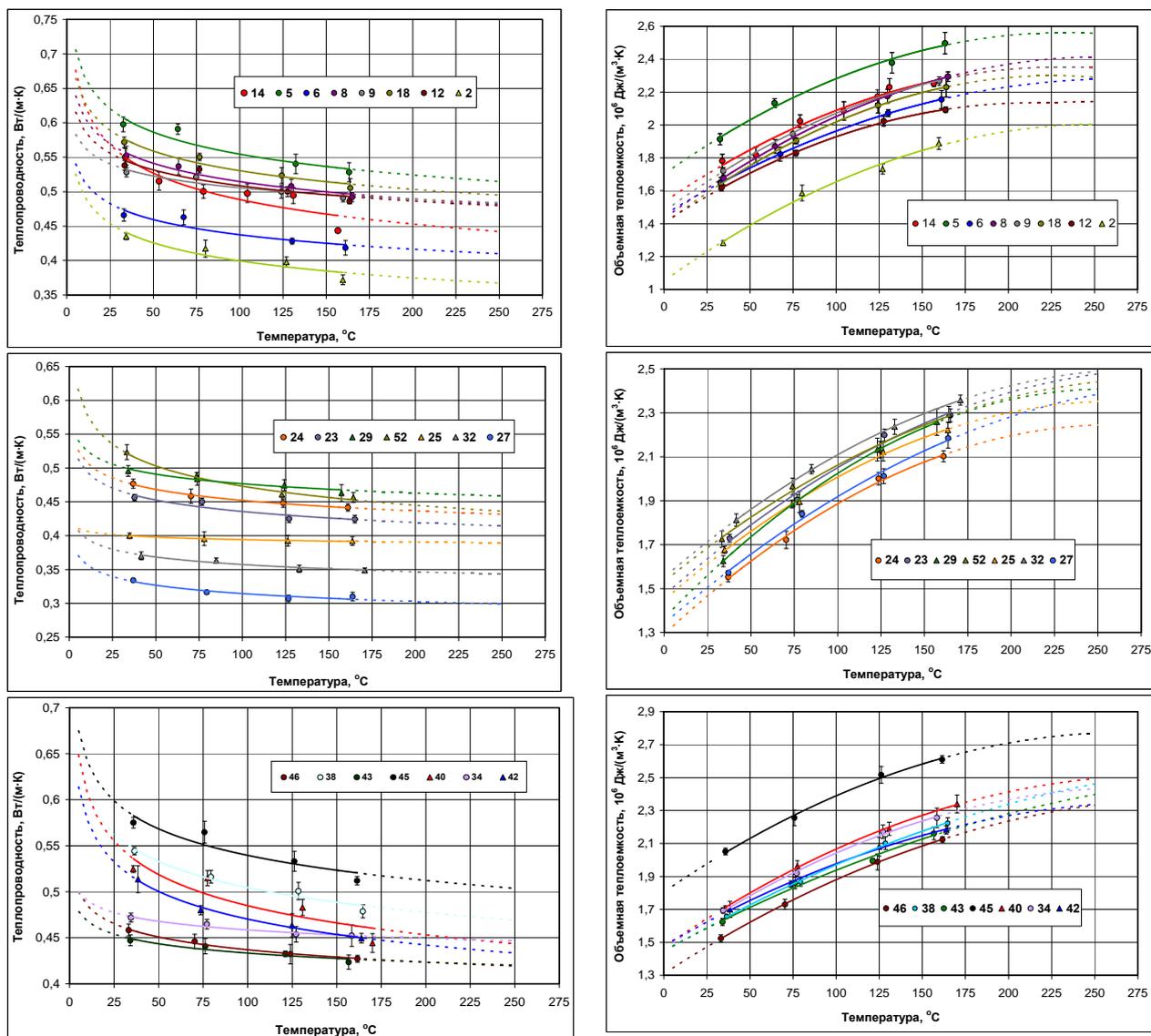


Рис. 13. Зависимость теплопроводности и объемной теплоемкости от температуры и при пластовом давлении для образцов, отобранных из пласта I, скважина №1 (верхние), пластов II и III, скважина №1(средние), пласта I, скважина №2 (нижние).

Из экспериментальных данных, видно, что с ростом температуры происходит рост значений объемной теплоемкости.

Для образцов из пласта I, скважины №1 объемная теплоемкость увеличивается в среднем на 28,6 % при максимальном и минимальном увеличении 23 и 38 % соответственно.

Для образцов из пластов II и III, скважины №1 объемная теплоемкость увеличивается в среднем на 29,5 % при максимальном и минимальном увеличении 26 и 33 % соответственно.

Для образцов из пласта I, скважины №2 объемная теплоемкость увеличивается в среднем на 28,3 % при максимальном и минимальном увеличении 24 и 33 % соответственно.

Проведен анализ экспериментальных данных полученных по результатам исследований тепловых свойств рыхлых пород при пластовых условиях:

1. Исследовано влияние увеличения температуры на вариации теплопроводности и объемной теплоемкости при естественном и 100% нефтенасыщении.

2. Исследовано влияние дифференциального давления (0,1 – 2,5 МПа) на вариации теплопроводности рыхлого образца породы.

3. Исследованы вариации теплопроводности пород при изменении температуры от 25 до 150 °С при соответствующих пластовых давлениях, установлена зависимость относительного изменения теплопроводности ($\delta\lambda_T$) от значений теплопроводности, измеренных при 25°С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Модифицирована установка для исследований тепловых свойств при пластовых термобарических условиях, повышена стабильность и безопасность измерений при совместном влиянии повышенных температуры T (до 250 °С), двух компонентного внешнего (до 200 МПа) и порового (до 80 МПа) давлений.

2. Разработана новая установка для измерений тепловых свойств консолидированных горных пород при совместном влиянии повышенных температуры, всестороннего и порового давлений.

3. Проведены метрологические исследования модифицированной установки в интервале температур до 180 °С, которые показали, что относительные систематические погрешности измерений теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости не превышают 6% (при уровне доверительной вероятности 0,95).

4. Разработана ячейка для измерений теплопроводности образцов рыхлых пород в диапазоне давления до 2,5 МПа и температуры от 25 до 180 °С.

5. Проведены метрологические исследования разработанной ячейки, которые показали, что полная погрешность измерений теплопроводности составляет ± 6 % (при доверительной вероятности 0,95).

6. Установка оптического сканирования адаптирована для измерений тепловых свойств рыхлых пород, метрологические исследования установки показали, что полная погрешность измерений теплопроводности составила $\pm 3\%$, температуропроводности $\pm 5\%$, объемной теплоемкости $\pm 6\%$ (при доверительной вероятности 0,95).

7. Получены надежные данные, значительно расширяющие базу данных о комплексе тепловых свойств консолидированных и рыхлых пород коллекторов, подстилающих и перекрывающих пород, как при нормальных, так и при пластовых термобарических условиях с учетом насыщения пород различными порозаполняющими флюидами (воздух, нефть, вода).

8. При помощи теории эффективных сред (ТЭС) проведено исследование влияния пластовых давления и температуры на геометрию порово-трещиноватого пространства консолидированных пород.

9. По результатам измерений теплопроводности рыхлых пород при пластовых термобарических условиях выполнен прогноз теплопроводности в области пониженных и повышенных температур до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно.

10. На основе экспериментальных данных о тепловых свойствах рыхлых пород при нормальных термобарических условиях, тепловых свойствах слабоконсолидированных песчаников при РТ условиях и теплопроводности песков при РТ условиях выполнена оценка значений объемной теплоемкости в температурном диапазоне $5\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

11. Проведен анализ влияния степени нефтенасыщенности на тепловые свойства трех образцов рыхлых пород коллекторов месторождения тяжелых нефтей.

12. Проведен анализ влияния на теплопроводность последовательного уплотнения образца рыхлой породы давлением от 0,1 до 2,5 МПа.

13. Установлены закономерности изменения теплопроводности пород от температуры и давления, которые позволяют осуществлять прогноз теплопроводности пород при пластовых условиях в широком диапазоне температур ($5\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$), характерном при добыче нефти тепловыми методами.

Публикации по теме диссертации

1. Тарелко Н.Ф., Миклашевский Д.Е., Горобцов Д.Н., Попов Ю.А., Бажин К.И., Ромушкевич Р.А., Буркхардт Г., Майр С. Тепловые свойства пород импактной структуры Чизэйпик при моделировании пластовых термобарических условий. Известия Вузов. Геология и разведка, 2010, № 5, с. 66-71.
2. Новиков С.В., Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Тарелко Н.Ф., Татаринцов В.Ю. Прибор для измерений теплопроводности флюидов и результаты его применения. Известия вузов. Геология и разведка, 2009, №2, с. 56-60.
3. Бажин К.И, Тарелко Н.Ф, Миклашевский Д.Е Метрологический анализ прибора для измерений тепловых свойств пород при пластовых условиях. Тезисы докладов научной конференции «МОЛОДЫЕ – НАУКАМ О ЗЕМЛЕ». Москва, РГГРУ, 2010, с 174
4. Бажин К.И. Тарелко Н.Ф. Миклашевский Д.Е. Аппаратурно-методическая база для лабораторных измерений тепловых свойств пород при моделировании пластовых термобарических условий. Сборник тезисов докладов VII Международной научно практической конференции молодых специалистов «Геофизика – 2009», С.П.Б., 2009, с 63-66.
5. Миклашевский Д.Е., Тарелко Н.Ф. Результаты измерений тепловых свойств осадочных пород при пластовых условиях. Тезисы докладов научной конференции «МОЛОДЫЕ – НАУКАМ О ЗЕМЛЕ». Москва, РГГРУ, 2010, с 180.
6. Миклашевский Д.Е, Горобцов Д.Н., Тарелко Н.Ф., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Буркхардт Г., Вильгельм Г., Майр С., Хайдингер Ф. Прогноз распределения тепловых свойств вдоль научной скважины Айрвилл (США). Тезисы докладов научной конференции «Новые идеи в науках о Земле», М., РГГРУ, 2009, с. 132
7. Миклашевский Д.Е., Коробков Д.А., Тарелко Н.Ф., Столяров М.М. Комплексная методика исследований тепловых свойств пород при пластовых условиях. Сборник докладов VIII Международная конференция "Новые идеи в науках о земле", М., РГГРУ, 2007, с. 364-369.

8. Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Тарелко Н.Ф. Экспериментальные исследования тепловых свойств пород, вскрытых Уральской сверхглубокой скважиной СГ-4, при повышенных термобарических условиях. Сборник докладов VIII Международной конференции " Новые идеи в науках о Земле", М., РГГРУ, 2007, с.369-372.
9. Миклашевский Д.Е., Тарелко Н.Ф., Лазаренко А.П. Модернизация экспериментальной установки для измерения тепловых свойств минералов и горных пород при пластовых условиях. Тезисы докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле». М., РГГРУ, 2008, с. 76
10. Миклашевский Д.Е., Тарелко Н.Ф., Ромушкевич Р.А., Попов Ю.А., Горобцов Д.Н. Тепловые свойства пород импактной структуры Чизэйпик при пластовых термобарических условиях. Сборник научных трудов X международной конференции "Тепловое поле Земли и методы его изучения". М., РГГРУ, 2008, с. 150-151.
11. Миклашевский Д.Е., Тарелко Н.Ф., Татаринов В.Ю. Тепловые свойства песчаников при пластовых условиях. Тезисы докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле».М., РГГРУ 2008, с. 78.
12. Тарелко Н.Ф. Миклашевский Д.Е. Тепловые свойства пород уральской сверхглубокой скважины СГ-4 при пластовых условиях. Сборник трудов докладов VII Международной научно практической конференции молодых специалистов «Геофизика – 2009»,С.Петербург, СПГУ, 2009, с 86- 88.
13. Тарелко Н.Ф., Бажин К.И., Лазаренко А.П. Аппаратурно-методическая база для измерений тепловых свойств горных пород при пластовых термобарических условиях. Сборник докладов X юбилейной международной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2009». Ухта, УГТУ, 2009, с 190-193.
14. Тарелко Н.Ф., Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Буркхарт Г., Вильгельм Г., Ромушкевич Р.А., Бажин К.И., Мсхиладзе А.З. Тепловые свойства пород импактной структуры Чизейпик (США) при пластовых термобарических условиях. Тезисы докладов научной конференции «Новые идеи в науках о Земле».М., РГГРУ 2009, с. 140.
15. Тарелко Н.Ф., Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Буркхарт Г., Вильгельм Г., Греджев В.В., Майр С., Хайдингер Ф. Изменения физических свойств при

переходе от нормальных к пластовым условиям. Тезисы докладов научной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М., РГГРУ 2009, с. 143.

16. Тарелко Н.Ф., Черепанов А. О., Валушцев О. А., Костерин М. И. Вертикальные вариации плотности теплового потока в Тагило-Магнитогорском мегасинклинории. Тезисы докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле». М., РГГРУ, 2008, с. 81.

17. Тарелко Н.Ф., Новиков С.В., Миклашевский Д.Е. Аппаратурный комплекс для измерения тепловых свойств рыхлых горных пород при моделировании пластовых термобарических условий. Тезисы докладов X международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М., РГГРУ 2011, с. 102

18. Miklashevskiy, D., Popov, Yu., Tertychnyi, V., Tarelko, N. Measurements of thermal properties of rocks and minerals at formation conditions: equipment and results. Abstract volume of EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2008.

19. Popov Y., Tarelko N., Romushkevich R., Gorobtsov D., Miklashevskiy D., Esipko O., Cherepanov A., Tatarinov V. Experimental geothermal data from the Yen-Yakhinskaya and Tyumen superdeep wells (West Siberia, Russia). Abstract volume of X General Assembly of IASPEI, Cape Town, South Africa, January 9-16, 2009.

20. Popov, Y.A., Spasennykh, M.Y., Miklashevskiy, D.E., Parshin, A.V., Stenin, V.P., Chertentkov, M.V., Novikov, S.V., Tarelko, N.F. Thermal Properties of Formations From Core Analysis: Evolution in Measurement Methods, Equipment, and Experimental Data in Relation to Thermal EOR. Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 19–21 October, 2010.