

На правах рукописи

АБДУЛАГАТОВА
Зумруд Заидовна

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СУХИХ
И ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ.
ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика
и теоретическая теплотехника (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Махачкала – 2010

Работа выполнена в учреждении Российской академии наук «Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Эмиров Субханверди Нурмагомедович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Ивлиев Андрей Дмитриевич

доктор технических наук, профессор
Алишаев Мухтар Гусейнович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
«Институт металлургии и материаловедения»
им. А.А. Байкова РАН

Защита состоится « 8 » июля 2010г. в 15.00 ч. на заседании диссертационного совета ДМ 002.071.01 при учреждении Российской академии наук «Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН» по адресу: 367030, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, д. 39а, актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения Российской академии наук «Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН».

Автореферат разослан «2» июня 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета ДМ 002.071.01
доктор технических наук

Базаев А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Параметром, характеризующим передачу тепла в средах, подобным горным породам, служит эффективная теплопроводность (ЭТ). Знание зависимости теплопроводности горных пород от давления и температуры $\lambda(P, T)$ позволяет экстраполировать вглубь земной коры, чтобы оценить распределение температуры с глубиной, следовательно, построить модель тепловой эволюции Земли.

Разработка геотермальных моделей Земли (тепловых полей Земли) требует глубокого знания зависимости теплопроводности различных слоев земной коры от температуры и давления. Расчеты локальных тепловых потоков $Q = -\lambda grad T$, определение локализаций глубинных аномалий тепловых зон (геотермальных аномалий) невозможны без данных о теплопроводности пород как функции от температуры и давления.

Теплопроводность связана с такими очень важными термодинамическими и акустическими свойствами пород, как коэффициент температуропроводности, теплоемкость, плотность, скорость звука, что позволяет использовать данные ЭТ для расчета этих свойств и проверки их корреляционных связей. Информация о тепловых свойствах горных пород, залегающих в толще Земли, т.е. находящихся при высоких давлениях и температурах, совместно с данными сейсмических наблюдений позволяет улучшить наши представления о внутреннем строении Земли.

Даже при многих упрощениях и допущениях теоретически точно предсказать теплопроводность пористых материалов сложно, а иногда и невозможно. Породы состоят из различных минералов с различным химическим составом, поэтому теплопроводность пород зависит не только от температуры и давления, но и от минералогического состава, структуры и геометрической конфигурации пор, их ориентации, распределения и упаковки, размеров зерен, формы трещин и их концентраций и т.д. Поэтому природа механизма теплопереноса в породах трудно поддается моделированию и теоретическому предсказанию. Следовательно, достоверные и точные данные о теплопроводности пород и ее зависимости от PT – условий очень важны для правильного понимания механизма теплопереноса в недрах Земли, выявления их природы и построения моделей для их предсказания.

Таким образом, экспериментальные исследования флюидонасыщенных пористых сред и горных пород в условиях высоких давлений и температур весьма актуальны в таких областях, как:

1. Геотермальная энергетика. С помощью геотермии и гидрогеологии при применении данных о тепловых свойствах пород решаются такие задачи, как поиск и разведка подземных вод, изучение направлений их миграции, локализации тепловой энергии Земли, оценка запасов тепловой энергии и т.д. Тепловые методы улучшают технологию вытеснения нефти, повышения нефтеотдачи скважин, а также исследования процессов генерации и накопления нефти и газа, эксплуатацию скважин (особенно в холодных зонах).
2. Инженерия. Решение ряда инженерных проблем (теплоизоляции зданий), раз-

витие ряда технологий авиационной и металлургической промышленности, солнечной энергетики, создание новых композиционных материалов с заданными свойствами, ядерных материалов, металлокерамических композитов, порошковых технологий, термоядерных сплавов, гранулированных материалов, волокнистых композитов, криогенных технологий, многослойных изоляционных систем невозможно без точных данных о теплопроводности пород.

3. Промышленное и гражданское строительство (строительство дорог, зданий, подземных сооружений с целью экономии тепловой энергии, бурение скважин, перенос тепла через почву).

В качестве **объектов исследования** были выбраны образцы горных пород, таких как андезит, алевролит, доломит, амфиболит, гранулит, пироксен-гранулит, известняк и песчаник.

Предмет исследования – механизм переноса тепла в сухих и флюидонасыщенных горных породах, влияние температуры, давления, пористости на ЭТ сухих и флюидонасыщенных горных пород.

Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование влияния гидростатического давления, температуры и флюидонасыщения на теплопроводность горных пород для установления механизма переноса тепла в этих средах, а также разработка уравнения состояния для пористых горных пород по данным эффективной теплопроводности.

Для достижения этой цели решались задачи:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния гидростатического давления, температуры и флюидонасыщения на теплопроводность горных пород.
2. Проверка согласованности экспериментальных результатов с теоретическими и полуэмпирическими моделями других авторов.
3. Определение значений структурных параметров пористой среды для ряда теоретических моделей по данным ЭТ и исследование их зависимости от температуры и давления.
4. Разработка уравнения состояния для пористых горных пород по данным ЭТ.

Научная новизна:

1. Получены экспериментальные данные по ЭТ горных пород (андезит, алевролит, доломит, амфиболит, гранулит, пироксен-гранулит, известняк и песчаник с разными пористостями) при давлениях до 400 МПа и температурах от 273 до 523 К и выполнены оценки применимости теоретических моделей и их предсказывающей способности. Предложена новая полуэмпирическая модель, описывающая поведение ЭТ в зависимости от температуры, давления и пористости.
2. Определены значения структурных параметров различных моделей, показано, что в некоторых моделях экспериментально найденные значения этих параметров отличаются от их теоретического значения. Вычислены значения изотермической сжимаемости K_T и коэффициента теплового расширения α по данным ЭТ пористых пород.

3. Получено уравнение состояния для сухих и флюидонасыщенных горных пород (песчаника пористостью $\phi = 13\%$) на основе прямых измерений теплопроводности с помощью модели Hofmeister, предполагающей связь барического коэффициента ЭТ с изотермической сжимаемостью.

Практическое значение работы:

- результаты измерений ЭТ горных пород могут быть использованы для моделирования тепловой эволюции Земли, предсказания измерений температуры земных слоев с глубиной, расчета геотермальных источников тепла (разработки трехмерной модели температурных и тепловых полей конкретного региона), оценки тепловых свойств горных пород на не разведанных бурением глубинах, моделирования процессов вытеснения нефти из пористых резервуаров, инженерных расчетов теплоизоляции, синтеза новых теплоизоляционных материалов с заранее заданными свойствами и т.д.;
- результаты экспериментальных исследований теплопроводности флюидонасыщенных пористых сред позволяют оценить точность теоретических моделей, описывающих, эффективную теплопроводность сложных многокомпонентных сред в зависимости от температуры, давления, флюидонасыщения и пористости, а также усовершенствовать их (повысить их точность и точность предсказания);
- результаты исследований позволяют расширить и улучшить наши представления о процессах и механизме теплопереноса в пористых материалах;
- экспериментальные и теоретические результаты данной работы могут служить основой для разработки уравнения состояния и расчета термодинамических (теплоемкости) и акустических (скорости звука) свойств пористых материалов при высоких температурах и давлениях.

Автор защищает:

- Массив новых экспериментальных данных ЭТ сухих и флюидонасыщенных пористых горных пород (алевролит, доломит, песчаник с пористостями 5%, 13%, 16.2%, амфиболит, известняк, андезит, гранулит и пироксен-гранулит) в интервале температур 273 – 523 К и давлений до 400 МПа.
- Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с различными теоретическими и эмпирическими моделями.
- Структурные параметры для пористой среды, полученные по экспериментальным данным эффективной теплопроводности горных пород, и их зависимость от температуры и давления.
- Полуэмпирическая модель, описывающая одновременное влияние температуры, давления и пористости на теплопроводность пористых материалов.
- Уравнение состояния для сухих и флюидонасыщенных образцов песчаника, полученное на основе прямых измерений теплопроводности, используя модель Hofmeister.

Личный вклад автора.

Автор принимал непосредственное участие:

- В проведении экспериментальных исследований теплопроводности сухих и флюидонасыщенных пористых горных пород;

- При получении новой полуэмпирической модели, описывающей одновременное влияние температуры, давления и пористости;
- При определении значений структурных параметров для пористой среды по данным ЭТ, исследовании зависимости структурных параметров и сопоставлении полученных экспериментальных данных с теоретическими моделями, описывающими теплоперенос в сложных многокомпонентных средах;
- В разработке уравнения состояния для сухих и флюидонасыщенных горных пород.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на:

- Международном симпозиуме “Порядок, беспорядок и свойства оксидов” (Сочи, 2005 г.);
- Международном симпозиуме “Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах” (Сочи, 2005г.);
- 11-ой Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (Санкт - Петербург, 2005г.);
- 12-ой Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (Москва, 2008г.);
- Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» (Махачкала, 2005г.);
- Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала, 2005г.);
- 17-ом Международном теплофизическом симпозиуме (Боулдер, Колорадо, США, 2009г.).

Публикации: Основные результаты диссертационной работы опубликованы в журналах «Известия РАН, сер. Физическая», «J. Chemical and Engineering Data», “International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences”, “Journal of Petroleum Science and Engineering” (в печати), а также в научных сборниках. Всего по теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 в изданиях по перечню ВАК Российской Федерации.

Содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 173 страницах, содержит 67 рисунков, 14 таблиц и библиографию из 255 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность поставленной в работе проблемы, сформулирована цель и перечислены задачи, необходимые для ее достижения. Представлены основные защищаемые положения, научная и практическая ценность, а также новизна полученных результатов.

В первой главе содержится литературный обзор теоретических и экспериментальных исследований теплопроводности сухих и флюидонасыщенных пористых горных пород при высоких давлениях. Приведен подробный критический анализ работ и методик, посвященных экспериментальному исследованию теплопроводности твердых тел и пористых сред в условиях высоких давлений и температур. Показано, что почти все измерения ЭТ горных пород

были проведены следующими методами: контактные методы – метод иглообразного зонда (точность метода 2-3 %), метод разделенных брусков (точность метода 4 %), метод плоскопараллельных пластин (точность метода 4 %), метод нагретой нити (точность метода 4-5 %) и неконтактный метод – оптический метод сканирования (точность метода 2 %). Отмечены недостатки и преимущества каждого из этих методов. В частности, недостатком контактных методов является то, что они не учитывают ошибки измерения, обусловленные контактным тепловым сопротивлением между нагревателем и образцом. Неконтактные методы позволяют избежать ошибки измерения, обусловленные контактным сопротивлением, и выделить теплоперенос, обусловленный радиацией.

Особое внимание уделено обзору моделей, описывающих зависимость ЭТ от температуры, давления и пористости. Рассмотрены теоретические, эмпирические и полуэмпирические модели, а также модели, основанные на правиле смеси.

Вторая глава посвящена методике экспериментального исследования теплопроводности сухих и флюидонасыщенных пористых горных пород при высоких давлениях и температурах.

Для экспериментального исследования теплопроводности горных пород в условиях гидростатического давления до 400 МПа и температур от 273 К до 523 К применен один из вариантов плоского стационарного метода. Схема изображения установки приведена на рис.1.

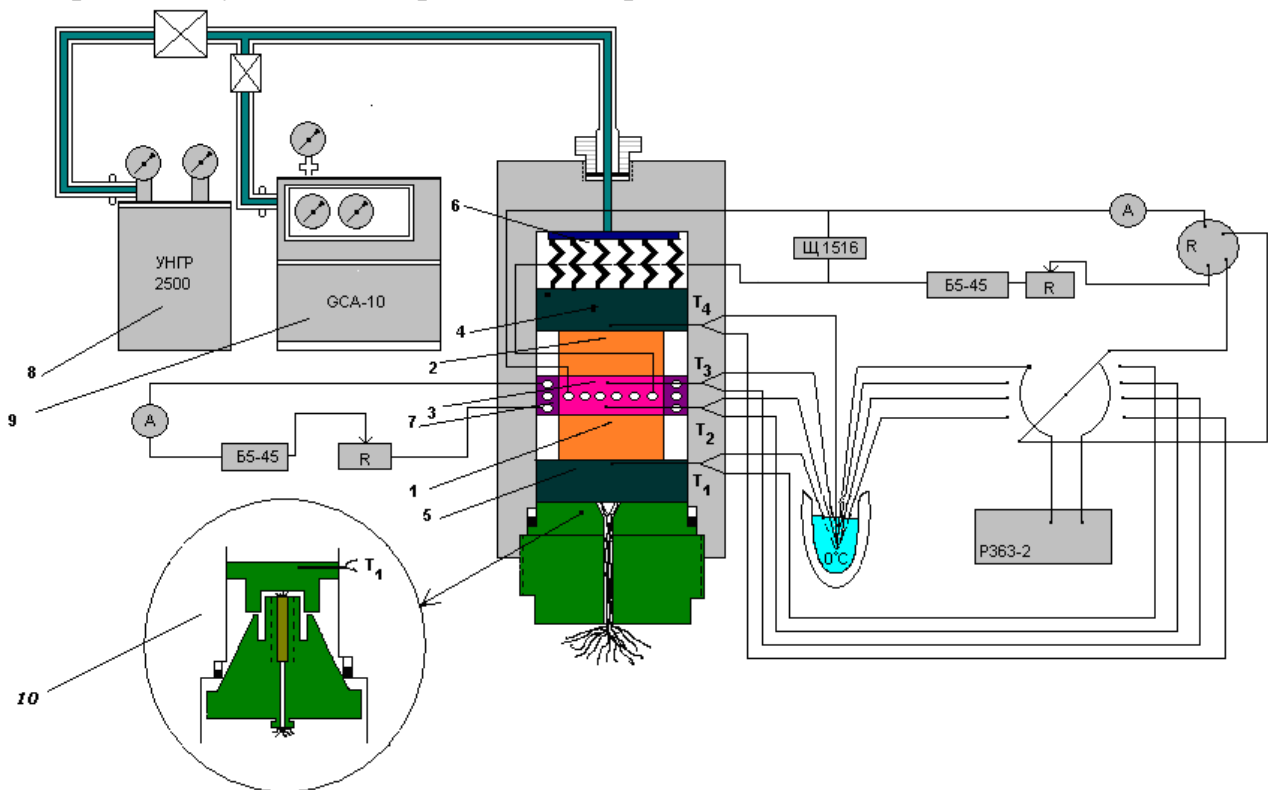


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых тел при высоких давлениях и температурах. 1 и 2 – образцы исследуемого материала, 3 – нагреватель, 4 и 5 – холодильники, 6 – пружина, 7 – компенсационный нагреватель, 8 – масляный компрессор, 9 – газовый компрессор, 10 – обтюратор.

Тепловые потери от боковой поверхности образцов (1) и (2) (рис.1) вычислялись по формуле цилиндрического слоя:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{2\pi\lambda_m \ell \cdot \Delta T}{\ln(d_1/d_2)},$$

где d_1 и d_2 – наружный диаметр образцов и внутренний диаметр камеры высокого давления, соответственно; ℓ – высота образцов; ΔT – разность температур между внутренней поверхностью камеры и боковой поверхностью образцов; λ_m - теплопроводность газа (аргона) или касторового масла.

Максимальная относительная ошибка экспериментальных данных вычислялась по формуле

$$\delta\lambda = \frac{\delta Q}{1 - \frac{Q_{\text{ном}}}{Q}} + \frac{\delta Q_{\text{ном}}}{\frac{Q_{\text{ном}}}{Q} - 1} + \frac{\delta S_1 + \delta h_1 + \delta(\Delta T_1)}{1 + \frac{S_2}{S_1} \frac{h_1}{h_2} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} + \frac{\delta S_2 + \delta h_2 + \delta(\Delta T_2)}{1 + \frac{S_1}{S_2} \frac{h_2}{h_1} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (1)$$

где $\delta Q=0.57\%$, $\delta Q_{\text{ном}}=0.2\%$, $Q=0.28$ Вт, $Q_{\text{ном}}=0.02$ Вт, $\Delta T_1=2$ К, $\Delta T_2=1.5$ К, $\delta S_{1,2}=0.33\%$, $\delta h_{1,2}=0.33\%$, $\delta(\Delta T_{1,2})=0.1\%$. Максимальная погрешность измерения теплопроводности данным методом составляет 4 %. Очевидно, что это значение погрешности измерения (4%) не включает ошибки, обусловленные контактным термосопротивлением и теплопереносом за счет радиации, которые не могут быть оценены без точного знания оптических характеристик образца.

Третья глава посвящена результатам экспериментальных исследований теплопроводности сухих (алевролит, доломит, песчаник ($\phi=5\%$), песчаник ($\phi=16.2\%$), песчаник ($\phi=13\%$), известняк, амфиболит, гранулит, пироксен-гранулит, андезит) и флюидонасыщенных (песчаник ($\phi=16.2\%$), песчаник ($\phi=13\%$)) образцов горных пород. В таблицах 1 – 3 приведены результаты измерений ЭТ для сухого, водо- и маслонасыщенного песчаника с пористостью 13%.

Для всех исследованных горных пород при низких давлениях (до 100 МПа) наблюдается резкий аномальный рост ЭТ (рис. 2 и 3), в то время как при высоких давлениях (выше 100 МПа) ЭТ слабо увеличивается с ростом давления

$$\lambda(P) = \lambda_c (1 + \beta_p P).$$

С увеличением температуры ЭТ песчаника ($\phi=13\%$) почти линейно уменьшается с температурой (рис. 2 и 3).

Таблица 1. Экспериментальные значения ЭТ λ ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) сухих образцов песчаника ($\phi=13\%$) при различных температурах и давлениях

T, К	Давление, МПа									
	0.1	20	50	100	150	200	250	300	350	400
275	2.71	2.82	2.86	2.89	2.90	2.91	2.92	2.93	2.93	2.94
323	2.63	2.73	2.77	2.84	2.85	2.86	2.87	2.88	2.88	2.89
373	2.56	2.65	2.72	2.77	2.78	2.79	2.81	2.82	2.83	2.84
423	2.49	2.57	2.64	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.77	2.79
473	2.42	2.49	2.56	2.67	2.68	2.69	2.70	2.71	2.72	2.73
523	2.34	2.41	2.48	2.61	2.62	2.64	2.65	2.66	2.67	2.68

Таблица 2. Экспериментальные значения ЭТ водонасыщенного песчаника ($\phi=13\%$) при различных температурах и давлениях.

0.1 МПа		50 МПа		100 МПа		250 МПа	
T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
281	3.81	279	3.91	284	4.02	281	4.11
289	3.81	307	3.90	296	3.98	290	4.11
297	3.78	318	3.88	328	3.92	304	4.05
305	3.77	345	3.81	350	3.90	335	4.02
325	3.75	364	3.80	398	3.79	362	3.94
347	3.72	388	3.77	417	3.78	392	3.90
368	3.66	405	3.72	445	3.71	408	3.88
391	3.65	437	3.69	464	3.76	441	3.79
398	3.62	460	3.62	495	3.62	463	3.76
417	3.57	478	3.61	509	3.62	478	3.72
454	3.53	505	3.55	-	-	490	3.70
472	3.49	521	3.54	-	-	516	3.66
498	3.44	-	-	-	-	-	-
518	3.41	-	-	-	-	-	-

Таблица 3. Экспериментальные значения ЭТ маслонасыщенного песчаника ($\phi=13\%$) при различных температурах и давлениях.

0.1 МПа		50 МПа		100 МПа		250 МПа	
T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	T, К	$\lambda, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
288	3.18	291	3.44	294	3.54	294	3.62
318	3.15	308	3.42	316	3.50	309	3.61
344	3.11	322	3.40	334	3.45	356	3.53
356	3.09	329	3.37	352	3.43	370	3.48
388	3.02	362	3.34	364	3.40	394	3.45
428	2.96	378	3.31	392	3.38	418	3.39
470	2.91	399	3.25	406	3.33	427	3.37
500	2.87	428	3.23	435	3.31	467	3.31
515	2.83	463	3.15	457	3.24	492	3.25
-	-	495	3.12	481	3.23	505	3.22
-	-	520	3.06	507	3.16	519	3.21

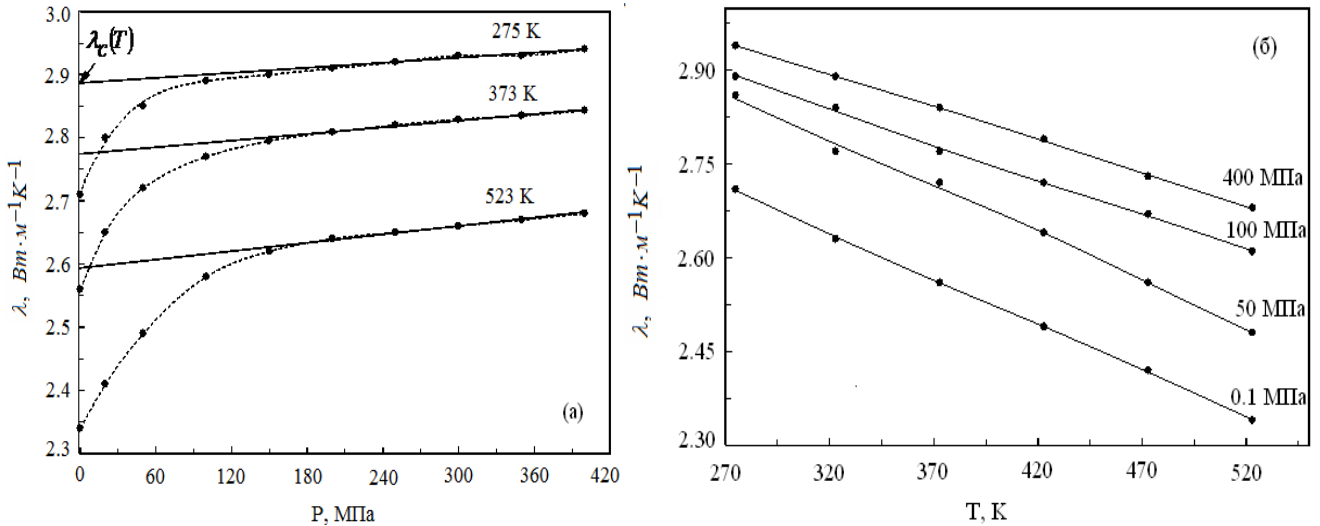


Рис.2. Экспериментальные значения ЭТ песчаника ($\phi=13\%$) как функции давления (а) и температуры (б) по различным изотермам и изобарам, соответственно. Сплошные линии (а) – линейная экстраполяция к нулевому давлению. Пунктирные линии (а) рассчитаны из уравнения (2).

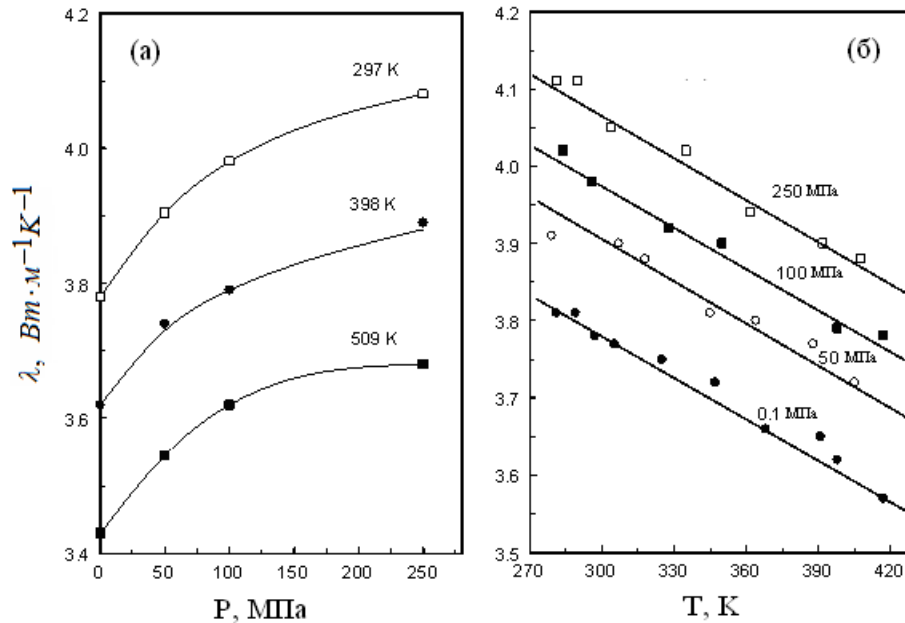


Рис.3. Экспериментальные значения ЭТ водонасыщенного песчаника ($\phi=13\%$) как функции давления (а) и температуры (б) по различным изотермам и изобарам, соответственно.

Четвертая глава посвящена обсуждению результатов измерений ЭТ сухих и флюидонасыщенных горных пород.

Полученные экспериментальные данные ЭТ пород были описаны простым полуэмпирическим соотношением

$$\lambda(T, P) = \lambda_{\infty}(T) \exp(-P_{кр}/P) + \lambda_0(T), \quad (2)$$

которое одновременно учитывает влияние температуры и давления на поведение ЭТ. Где $\lambda_0(T)$ есть температурная зависимость теплопроводности при атмосферном давлении, а $P_{кр}$ – кроссоверное давление или ширина области резкого роста теплопроводности. В (2) параметры λ_{∞} и λ_0 имеют простой физический

смысл, а именно, при $P \rightarrow \infty$, $\lim_{P \rightarrow \infty} \lambda(T, P) = \lambda_\infty(T) + \lambda_0(T)$, поэтому $\lambda_\infty(T)$ может быть оценен, как $\lambda_\infty(T) = \lim_{P \rightarrow \infty} \lambda(T, P) - \lambda_0(T)$ и при $P = 0$, имеем $\lim_{P \rightarrow 0} \lambda(T, P) = \lambda_0(T)$. Значение $\lim_{P \rightarrow \infty} \lambda(T, P)$ есть теплопроводность скелета $\lambda_c(T)$ при данной температуре. Значения $\lambda_\infty(T)$ и $\lambda_0(T)$ были описаны соотношениями:

$$\begin{aligned} \lambda_\infty(T) &= a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \text{ для сухих образцов;} \\ \lambda_\infty(T) &= \frac{1}{A + BT} \text{ для флюидонасыщенных образцов;} \\ \lambda_0(T) &= \frac{1}{C + DT} \text{ для сухого и флюидонасыщенного образцов.} \end{aligned} \quad (3)$$

Для сухого образца песчаника $a_0 = 1.7358 \times 10^{-2}$, $a_1 = 1.0272 \times 10^{-3}$, $a_2 = -8.1 \times 10^{-7}$, $C = 0.30532$, $D = 0.2302 \times 10^{-3}$ и $P_0 = 28$ МПа. Для маслонасыщенного образца $A = 1.5889$, $B = 1.3638 \times 10^{-3}$, $C = 0.26347$, $D = 0.17197 \times 10^{-3}$ и $P_0 = 32$ МПа. Для водонасыщенного $A = 2.4824$, $B = 1.5279 \times 10^{-3}$, $C = 0.2249$, и $D = 0.1304 \times 10^{-3}$ и $P_0 = 50$ МПа. Параметр P_0 почти не зависит от температуры или очень слабо зависит и может рассматриваться как постоянная величина без значительной потери точности. Уравнения (2) и (3) описывают одновременное влияние температуры и давления на теплопроводность горных пород. Как видно, теплопроводность горных пород при любых температурах и давлениях может быть предсказана, если известны только предельные значения теплопроводности при высоком давлении $\lim_{P \rightarrow \infty} \lambda(T, P)$ или теплопроводности скелета $\lambda_c(T)$ и значения теплопроводности при атмосферном давлении $\lambda_0(T)$, как функции от температуры. Модель (2) описывает измеренные значения теплопроводности для песчаника в пределах 0.5 % (рис.2). Только один подгоночный параметр P_0 можно оценить, используя экспериментальные данные. Это значительно облегчает предсказание теплопроводности пористых горных пород при любых температуре и давлении, используя минимальную экспериментальную информацию.

Используя уравнение (2) рассчитаны значения барического и температурного коэффициентов для всех исследованных горных пород. При высоких давлениях с увеличением температуры барический коэффициент давления β_p изменяется незначительно $(0.02 - 0.08) \times 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$, в то время как при давлениях ниже 100 МПа β_p изменяется очень резко $(0.35 - 1.05) \times 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$ для сухого песчаника (рис.4). Поэтому резкое увеличение теплопроводности было обнаружено при низких давлениях (ниже 100 МПа).

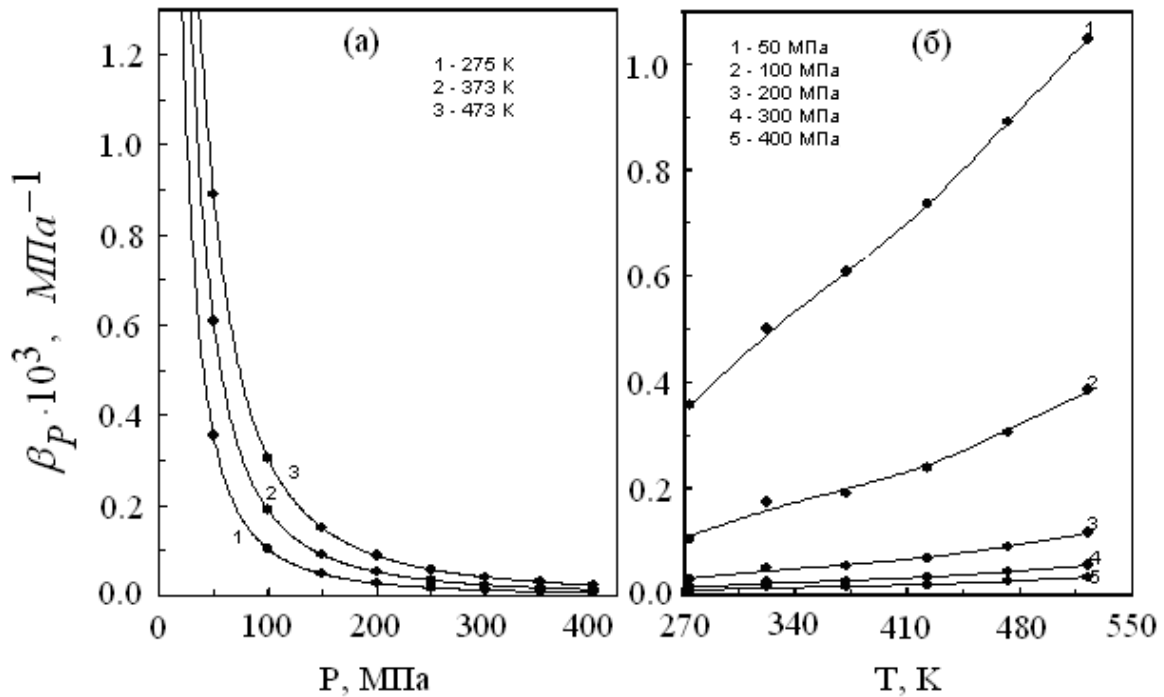


Рис.4. Барический коэффициент теплопроводности для сухого песчаника ($\phi=13\%$) как функция давления P (а) и температуры T (б) для некоторых изотерм и изобар. Символы получены из экспериментальных данных теплопроводности. Сплошные линии рассчитаны из уравнения (2).

При низких давлениях (в начальном участке) концентрация открытых пор высокая. Свободное пространство между микротрещинами заполнено воздухом, контакт между зернами очень плохой, поэтому теплопроводность и другие свойства (акустические, электрические, механические) в такой системе очень низкие. С увеличением давления концентрация пор (свободное пространство в породе, следовательно, и пористость) уменьшается (одни поры полностью закрываются, а другие становятся узкими), увеличивается плотность системы и величина изотермической сжимаемости K_T сильно меняется. Контакт между зернами существенно совершенствуется, что приводит к улучшению механизма переноса тепла, и теплопроводность аномально резко увеличивается.

Как показано на рис.5, при низких давлениях (ниже 100 МПа) β_T аномально резко увеличивается, как и барический коэффициент ЭТ. При высоких давлениях значения β_T очень слабо (незначительно) уменьшаются с увеличением давления. Также видно, что β_T незначительно изменяется с температурой при низких давлениях (рис.5 (б).), в то время как при высоких давлениях теплопроводность существенно зависит от температуры.

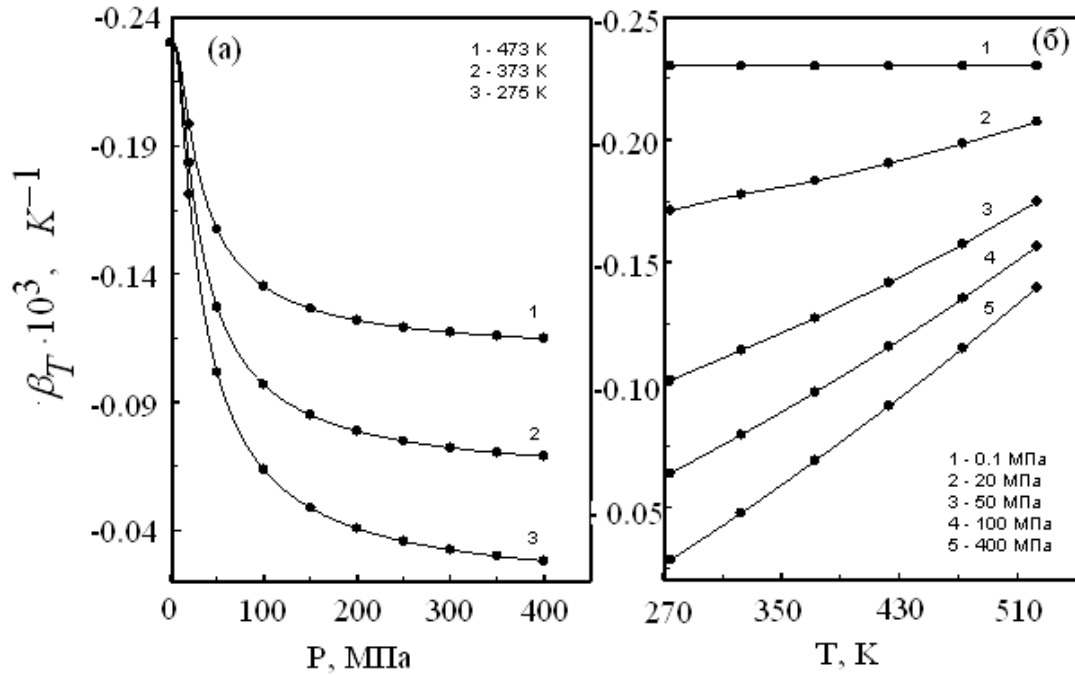


Рис.5. Значения температурного коэффициента теплопроводности β_T для сухого песчаника ($\phi=13\%$) как функция давления P и температуры T при некоторых изотермах и изобарах.

МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Проведен подробный анализ точности и прогнозирующей способности теоретических, эмпирических и полуэмпирических моделей, а также моделей, основанных на правиле смеси.

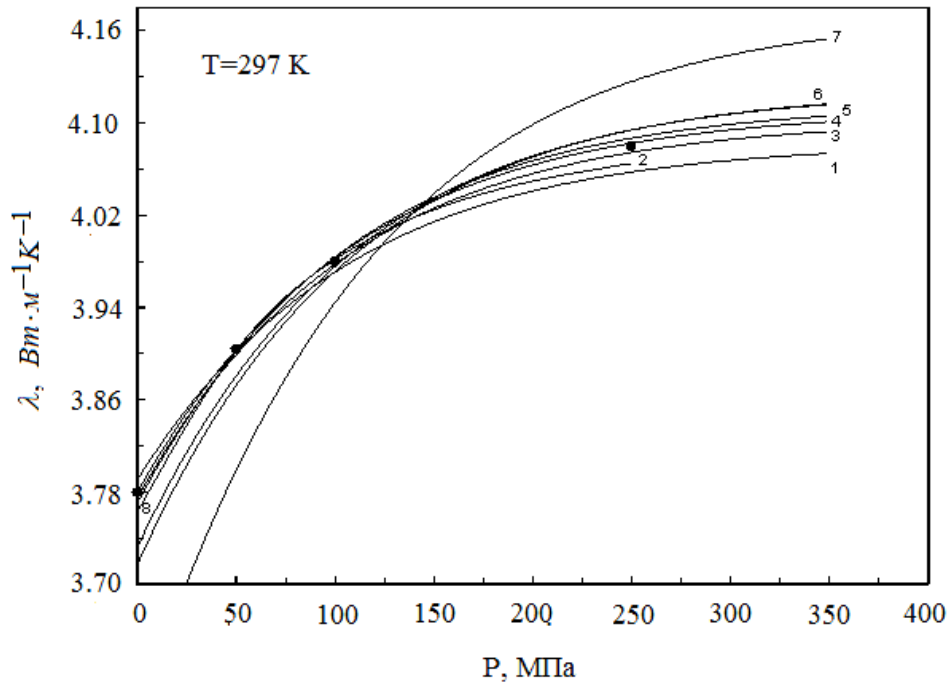


Рис.6. Зависимость ЭТ водонасыщенного песчаника ($\phi=13\%$) от давления, рассчитанная из различных моделей, где пористость принята как функция давления $\phi(P)$, вместе с нашими экспериментальными данными для температуры 297 К.

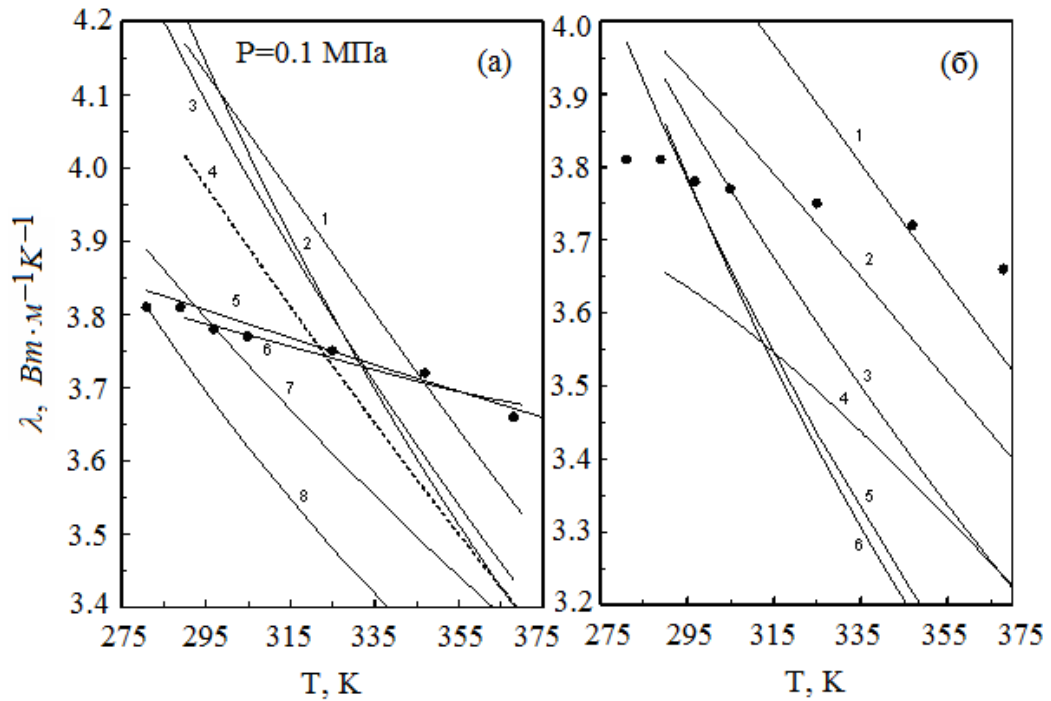


Рис.7. Измеренные и предсказанные значения ЭТ водонасыщенного песчаника как функции температуры при атмосферном давлении, где пористость рассматривалась как независимая от температуры.

Рис.7 показывает, что максимальное отклонение между экспериментально полученными данными ЭТ и значениями, предсказанными эмпирическими моделями, меньше чем, 10%. Хорошее согласие в пределах 1.2 % и 2.7 % было обнаружено между Funnell (рис.7 (а), кривая 5) и геометрической средней модели (рис.7 (а), кривая 6) с нашими экспериментальными данными, соответственно. Максимальное отклонение между измеренными и теоретически предсказанными значениями ЭТ из моделей, где теплопроводность скелета и насыщающего флюида рассматривалась как функция температуры, меньше 12%. Рис.7 показывает, что большинство, существующих предсказываемых моделей имеют более крутые наклоны, чем экспериментально наблюдаемые значения ЭТ. Причина в том, что эти модели не учитывают минералогический состав пористых горных пород, например, содержание кварца, которое существенно влияет на наклон изменения ЭТ с температурой. Другая причина заключается в том, что надо учесть температурную зависимость пористости.

Результаты расчетов для нескольких моделей ЭТ приведены на рис.8 и сравнены с одной экспериментальной точкой для пористости 13%, полученной в данной работе. Как видно из этого рисунка, значения, предсказанные моделями Sugawara и Yoshizawa (.....) и Volarovich (кривая 2), хорошо согласуются с нашими измерениями, а модель Anand $\lambda = \lambda_0(1-\phi)^4$ ($\lambda \propto \rho^4$) (кривая 3) дает заниженные значения для сухого песчаника на 20 %. Предсказания большинства теоретических моделей на 20-30 % больше, чем наше экспериментальное значение.

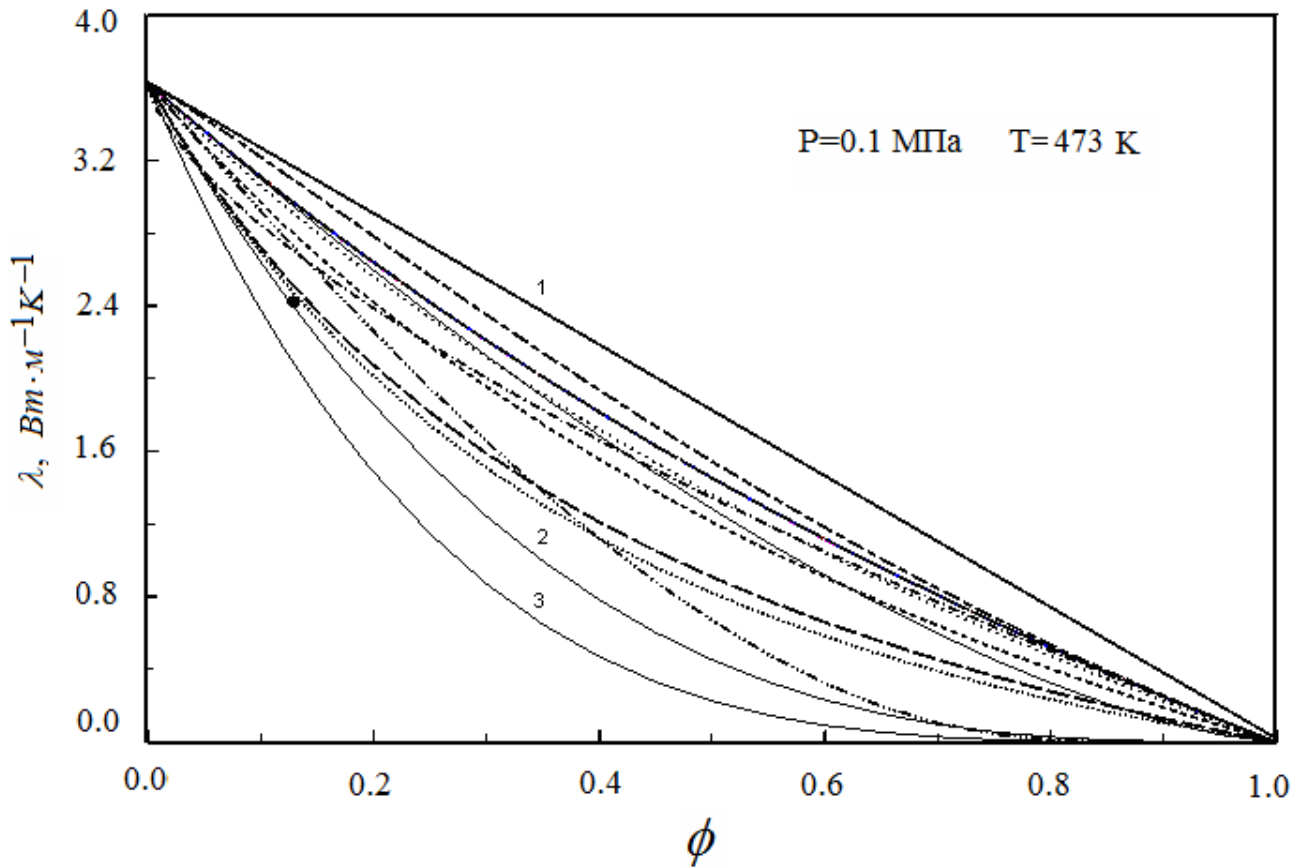


Рис.8. Эффективная теплопроводность песчаника как функция пористости, предсказанная различными теоретическими моделями, вместе с единственной экспериментальной точкой для пористости 13 %, полученной в данной работе при температуре 473 К и давлении 0.1 МПа.

Как видно из рис.9, предсказанные значения ЭТ геометрической средней (рис.9 (а) кривая 6), Sugawara и Yoshizawa (рис.9 (а) кривая 8), Asaad (рис.9 (а) кривая 9), Huang (рис.9 (б) кривая 3) и Chaudhary и Bhandari (рис.9 (б) кривая 4) моделями прекрасно согласуются с нашими измерениями ЭТ породы с пористостью 13%. Значения ЭТ, предсказанные моделями Lichtenecker, Bruggeman, Brown (второго порядка), Sidorov и Litovskii (рис.9 (а) кривые 1,4,3,5 и 2 соответственно) значительно выше, чем экспериментальные значения, полученные нами – на 45-50 %, в то время как модели Hsu и Brown (первого порядка) (рис.9 (а) кривые 10 и 11 соответственно) ниже, чем измеренное значение, примерно на 45 %.

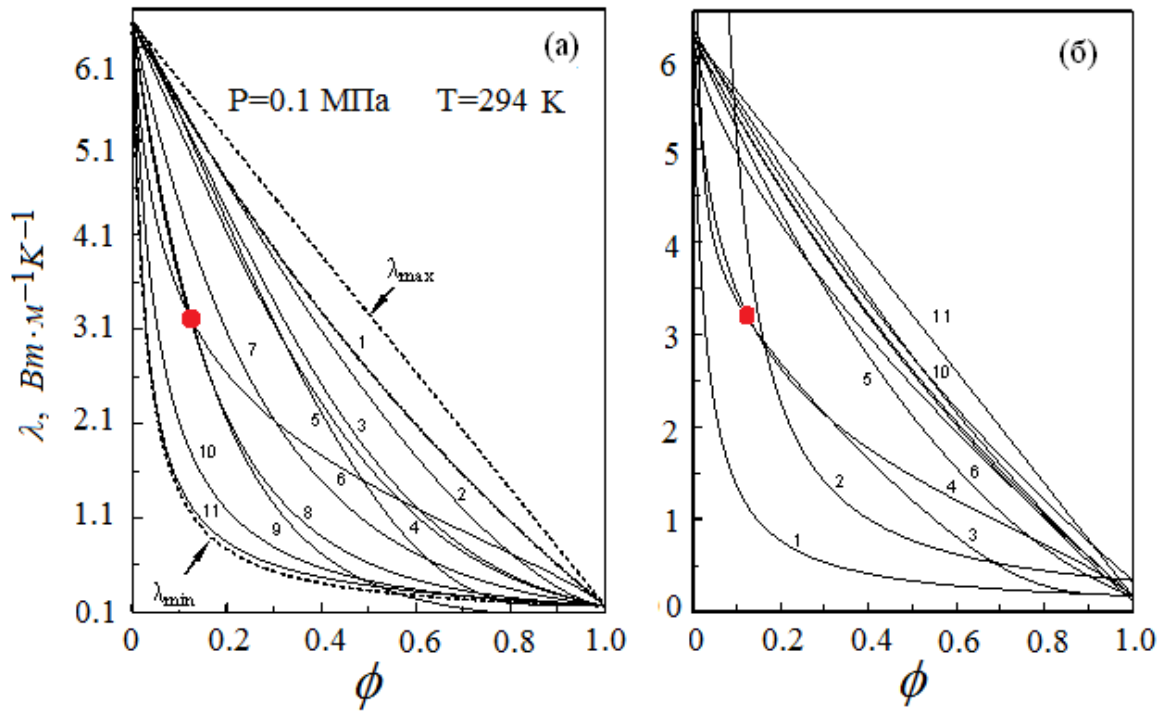


Рис.9. ЭТ маслонасыщенного песчаника как функция пористости, предсказанная из различных теоретических моделей вместе с экспериментальной точкой данной работы для пористости 13% при температуре 294 К и в давлении 0.1 МПа.

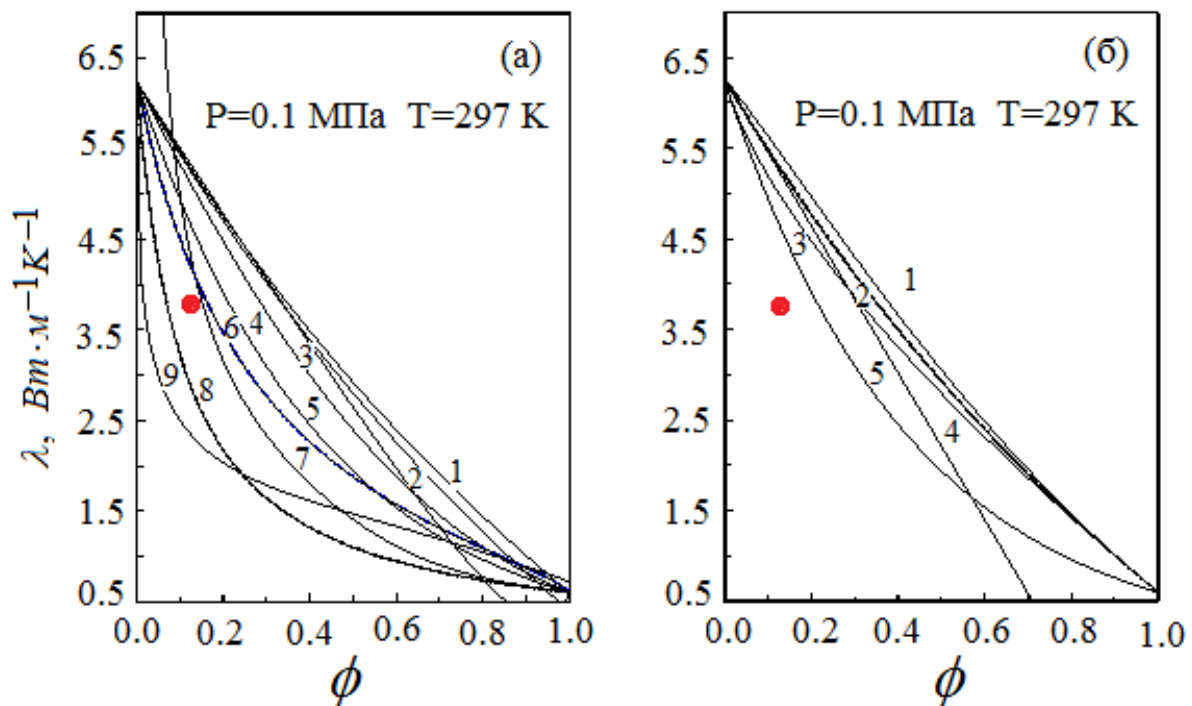


Рис.10. ЭТ водонасыщенного песчаника ($\phi=13\%$) как функция пористости, предсказанная на основе различных теоретических моделей вместе с экспериментальным значением.

Как видно из рис.10 (а), предсказанные значения ЭТ Chan и Huang (кривая б) отклоняются от наших измерений ЭТ в пределах 7.8%. В большинстве случа-

ев предсказанные значения ЭТ из различных моделей выше, чем наши измеренные значения. Например, значения ЭТ, предсказанные моделью Asaad (кривая 5) выше, чем наш экспериментальный результат на 21%, в то время как модели Bruggeman, Waff, Odalevskii, Brown (кривые 4,2,1,3 соответственно) выше на 34%. Две модели Ziman (кривая 8) и Chan и Jeffrey (кривая 9) предсказывают значения ЭТ, которые ниже, чем наш экспериментальный результат, на 34% и 64%, соответственно. На рис.10 (б) приведено сравнение между измеренными и предсказанными Russell, Rzhetskii и Novik, Mendel, Ribaud и геометрической средней (промежуточной) моделями (кривые 1,2,4,3 и 5 соответственно) значения ЭТ. Промежуточная модель (кривая 5) предсказывает те же самые значения, как и модель Asaad (кривая 5). Практически все модели предсказывают ЭТ водонасыщенного песчаника выше, чем экспериментальные значения в пределах от 21% до 34%.

Сравнение различных моделей, основанных на правиле смеси (параллельно и последовательно соединенная, первого и второго порядка геометрическая средняя, первого и второго порядка Максвелл модели, второго порядка арифметически и гармонически усредненные модели), вместе с нашим измеренным значением ЭТ для пористости 13 % представлены на рис.11 (а). Точность предсказанных значений ЭТ водонасыщенного песчаника этими моделями меняется в пределах от 7.9% до 45%. Лучшее согласие наблюдается для первой модели Максвелла (7.9 %), геометрическая и 2-ая средняя гармоническая модели предсказывают ЭТ в пределах от 21 до 26%, в то время как модель последовательного соединения и 2-го порядка геометрическая модель предсказывают ЭТ в пределах 34%. Согласие в пределах 39% наблюдается со второй Максвелловской моделью и второго порядка среднеарифметической моделью, в то время как модель параллельных соединений предсказывает ЭТ в пределах 45%. Kunii и Smith разработали модель, описывающую зависимость ЭТ от пористости, чтобы точно предсказать ЭТ флюидонасыщенных горных пород. Они разработали так называемую “lumped” параметрическую модель для уплотненных и неуплотненных материалов, типа песчаника. На рис.11 (б) приведены значения ЭТ для водонасыщенного песчаника, предсказанные из модели Kunii и Smith для различных значений безразмерного геометрического параметра Φ , который зависит от числа контактов n . Эта модель со значением геометрического параметра $\Phi=0.0626$ и $n=4\sqrt{3}$ (теоретические значения) согласуется с нашими измеренными значениями ЭТ в пределах 10%, в то время как при $\Phi=0.1589$ и $n=3/2$ (теоретические значения) предсказанные значения ЭТ на 52 % ниже, чем экспериментально наблюдаемое значение. Оптимальное значение геометрического параметра Φ (при $n=4\sqrt{3}$), полученное из наших экспериментальных данных ЭТ, $\Phi=0.078$ близко к теоретическому значению 0.0626.

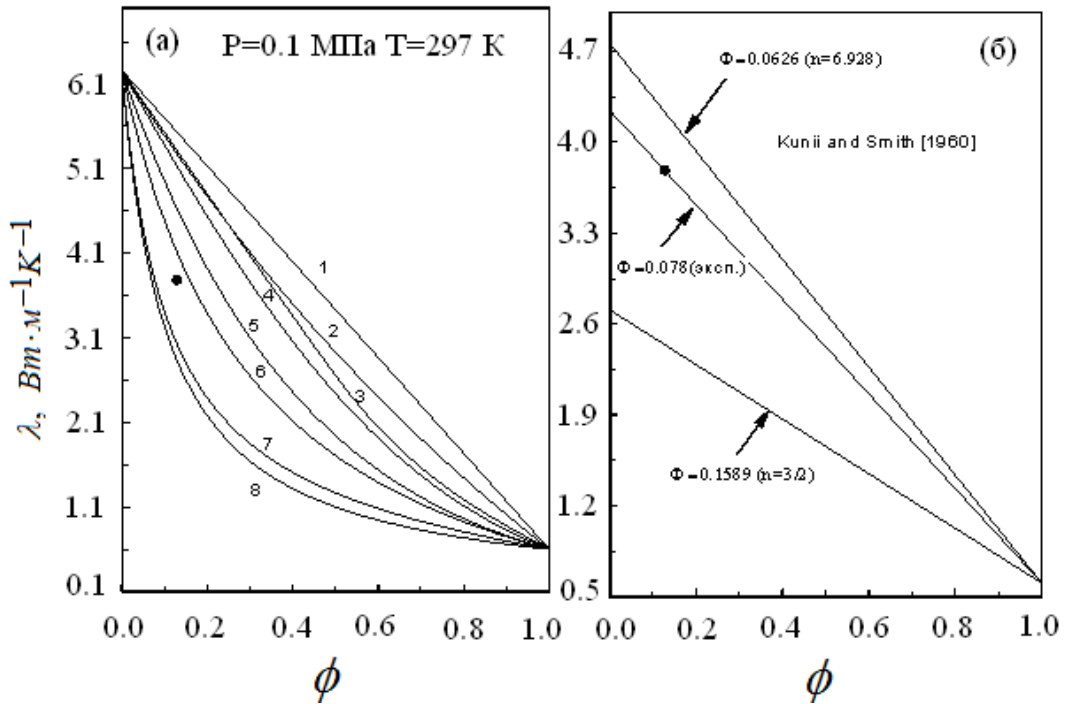


Рис.11. ЭТ водонасыщенного песчаника ($\phi=13\%$) как функция от пористости, предсказанная различными моделями, основанными на правиле смеси (а) и моделью Kunii и Smith (б) вместе с экспериментальным значением. 1- средняя арифметическая первого порядка, 2- модель Максвелла второго порядка, 3- арифметическая модель второго порядка, 4- геометрическая модель второго порядка, 5-геометрическая модель первого порядка, 6- модель Максвелла первого порядка, 7-гармоническая модель второго порядка, 8 – гармоническая модель первого порядка.

Уравнение состояния сухих и флюидонасыщенных горных пород при высоких температурах и давлениях

Hofmeister разработал теорию, объясняющую влияние давления на теплопроводность твердых тел. Его модель для теплопроводности решетки $\lambda_{\text{реи}}$ основана на концепции о времени жизни фонона. Он изучил температурную и барическую зависимость транспортных свойств на основе параметра Грюнейзена

$\gamma_{\text{тн}} = \alpha V K_T^2 / C_V$, объемного модуля $\chi_T = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$, и коэффициента теплового рас-

ширения, $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$.

Согласно модели Hofmeister, барический коэффициент ЭТ $\beta_P = \frac{\partial \ln \lambda}{\partial P}$, определяется следующим соотношением:

$$\frac{\partial \ln \lambda}{\partial P} = \frac{1/3 + 4\gamma_{\text{тн}}}{\chi_T}, \text{ или } \frac{\partial \ln \lambda}{\partial P} = K_T (1/3 + 4\gamma_{\text{тн}}). \quad (4)$$

Это соотношение было использовано нами для расчета изотермической сжимаемости K_T . Полученные значения изотермической сжимаемости K_T приведены в таблице 4 и показаны на рис.12 (а). Как видно, изотермическая сжимаемость K_T резко уменьшается при низких давлениях (ниже 100 МПа) подобно поведению ЭТ (рис.4).

Таблица 4. Рассчитанные из уравнения (4) (на основе экспериментальных значений ЭТ настоящей работы) значения изотермической сжимаемости K_T сухого песчаника как функция от температуры и давления

	$T=275 \text{ К}$	$T=323 \text{ К}$	$T=373 \text{ К}$	$T=423 \text{ К}$	$T=473 \text{ К}$	$T=523 \text{ К}$
$P, \text{ МПа}$	$K_T \times 10^3, \text{ МПа}^{-1}$	$K_T \times 10^3, \text{ МПа}^{-1}$	$K_T \times 10^3, \text{ МПа}^{-1}$	$K_T \times 10^3, \text{ МПа}^{-1}$	$K_T \times 10^3, \text{ МПа}^{-1}$	$K_T \times 10^3, \text{ МПа}^{-1}$
20	0.2741	0.3377	0.3730	0.4015	0.4082	0.4090
50	0.0694	0.1077	0.1186	0.1432	0.1735	0.2040
100	0.0203	0.0337	0.0370	0.0464	0.0594	0.0752
150	0.0094	0.0161	0.0177	0.0225	0.0292	0.0379
200	0.0054	0.0094	0.0103	0.0132	0.0173	0.0227
250	0.0035	0.0062	0.0068	0.0087	0.0114	0.0151
300	0.0025	0.0043	0.0048	0.0061	0.0081	0.0107
350	0.0018	0.0032	0.0035	0.0045	0.0060	0.0080
400	0.0014	0.0025	0.0027	0.0035	0.0047	0.0062

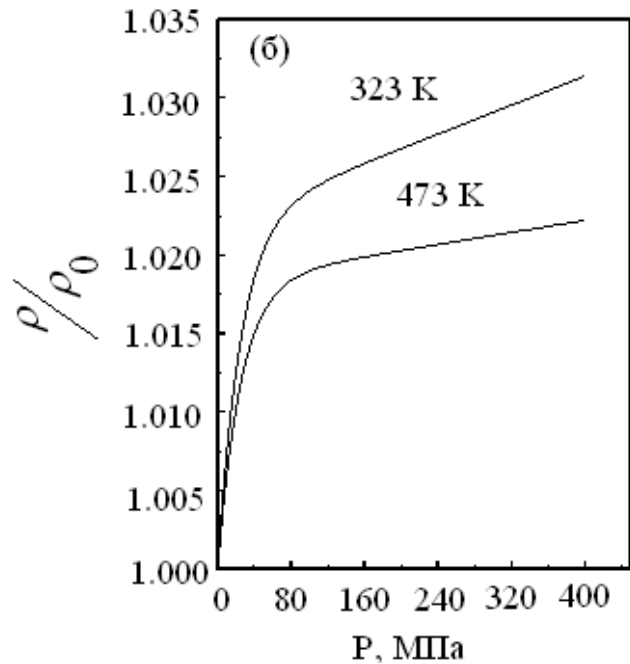
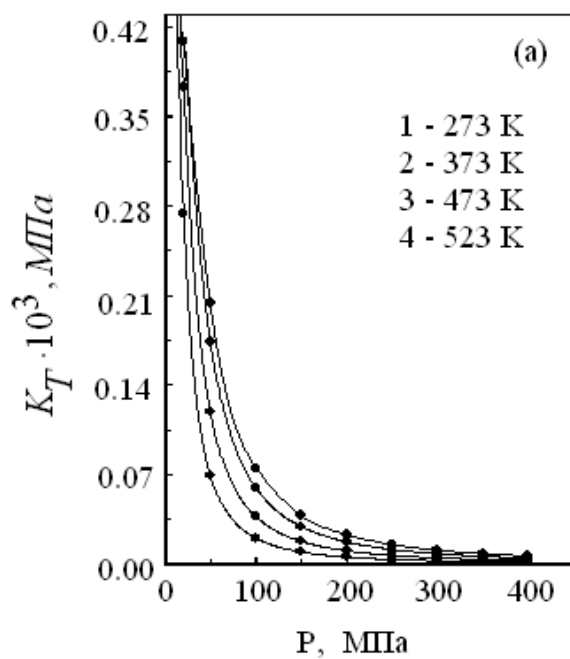


Рис.12. (а): Коэффициент изотермической сжимаемости K_T для песчаника как функция давления P для различных изотерм. Символы получены из экспериментальных данных теплопроводности настоящей работы из ур. (4). Сплошные линии рассчитаны из уравнения (5). (б): Плотность песчаника как функция давления вдоль изотермы 323 К рассчитанная из уравнения состояния (6).

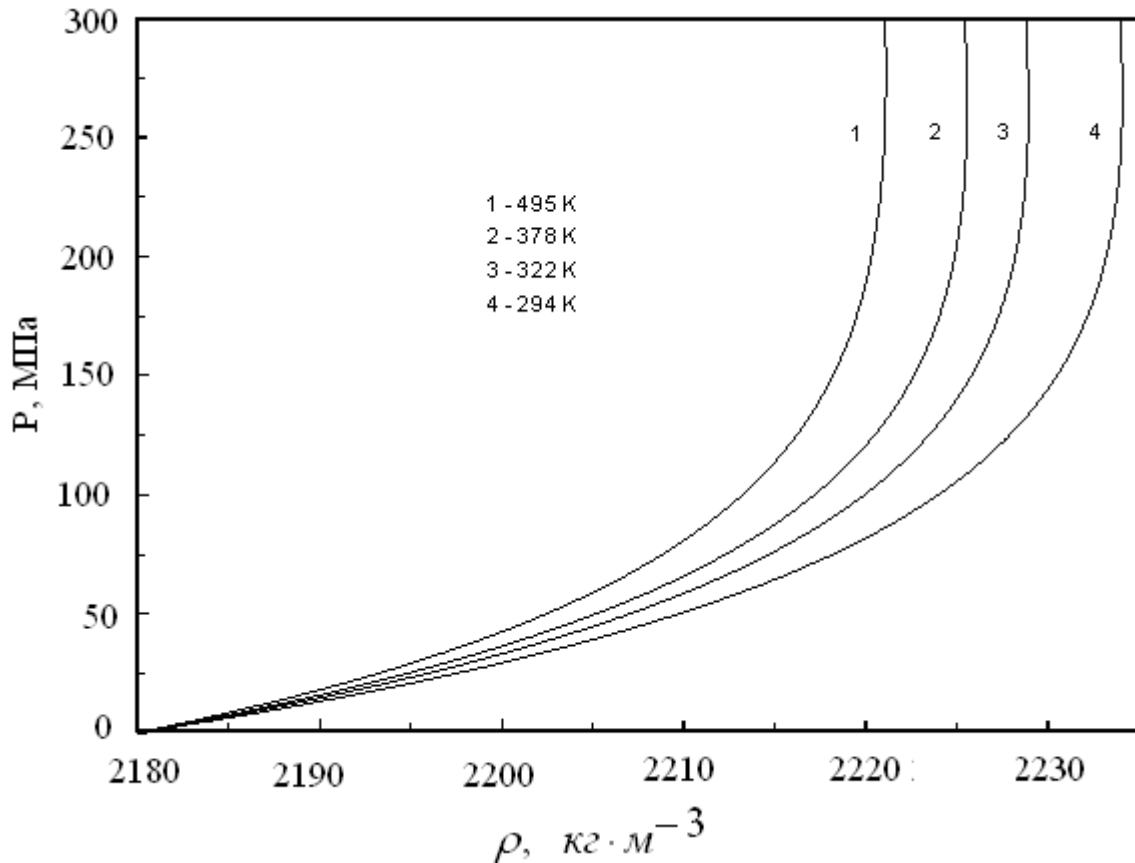


Рис.13. Плотность маслонасыщенного песчаника как функция давления вдоль различных изотерм, рассчитанных из уравнения состояния (6).

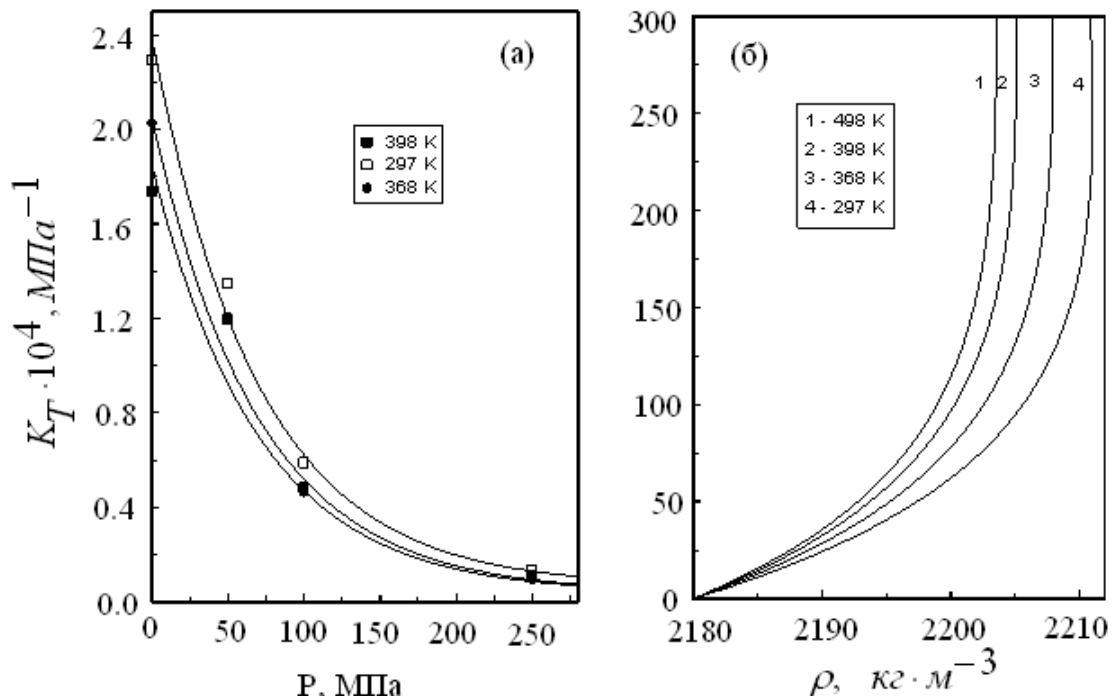


Рис.14. Значения изотермической сжимаемости K_T (а) и $P\rho T$ диаграмма (б) водонасыщенного песчаника, полученные из наших экспериментальных данных об ЭТ. (а): символы получены из экспериментальных данных ЭТ. Сплошные линии рассчитаны из уравнения (5). (б): сплошные линии рассчитаны из уравнения (6).

Значения K_T , полученные из уравнения (4) могут быть описаны в виде экспоненциальной функции

$$K_T = K_{T_0} + A \exp(-P/P_0). \quad (5)$$

Путем интегрирования соотношения (4) получим следующее уравнение для расчета плотности породы как функции температуры и давления:

$$\rho(P, T) = \exp \left\{ \ln \rho_0 + 10^{-3} [K_{T_0}(P - 0.1) - AP_0(\exp(-P/P_0) - \exp(-0.1/P_0))] \right\}, \quad (6)$$

где $\rho_0(20) = (1 - \phi)\rho_{\text{сух}}(20) + \phi\rho_{\text{ф}}(20)$ – эффективная плотность флюидонасыщенного песчаника при $P=0.1$ МПа и $T=293.15$ К, $\rho_{\text{сух}}(P=0.1, T=293.15)=2180$ кг·м⁻³ – плотность сухого образца, $\rho_{\text{в}}(20)=998.2$ кг·м⁻³ – плотность воды и $\rho_{\text{м}}(20)=987$ кг·м⁻³ – плотность масла при этих условиях. Все параметры ур. (6) определены из наших экспериментально полученных данных ЭТ. Значения эффективного давления как функции плотности, рассчитанные из ур. (6), приведены на рис.12 (б), 13 и 14. Плотность песчаника как функция температуры может быть вычислена из эмпирического отношения, предложенного Somerton и Selin $\rho_0(T) = \rho_0(20)[1 + (1 - 20)\beta_s]$, где $\beta_s = 0.5 \times 10^{-4} T^{-1}$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведены измерения эффективной теплопроводности для сухих (алевролит, доломит, песчаник ($\phi=5\%$), песчаник ($\phi=16.2\%$), песчаник ($\phi=13\%$), известняк, амфиболит, гранулит, пироксен-гранулит, андезит), водонасыщенных и маслонасыщенных (песчаник ($\phi=16.2\%$), песчаник ($\phi=13\%$)) пористых горных пород при температурах от 273 К до 523 К и давлении до 400 МПа.
2. Экспериментально обнаружен резкий рост ЭТ пористой горной породы при давлениях ниже 100 МПа. При давлениях выше 100 МПа наблюдается слабый линейный рост ЭТ с увеличением давления. Такое поведение ЭТ объясняется тем, что с увеличением давления концентрация пор (свободное пространство в породе) уменьшается (одни поры полностью закрываются, а другие становятся узкими), увеличивается плотность системы, и величина изотермической сжимаемости K_T сильно меняется. Контакт между зернами существенно улучшается, что приводит к улучшению механизма переноса тепла, и теплопроводность аномально резко увеличивается.
3. При высоких давлениях наблюдается значительное ослабление температурной зависимости теплопроводности.
4. Барические и температурные коэффициенты ЭТ резко уменьшаются с ростом давления при значениях $P < 100$ МПа и слабо снижаются при давлениях $P > 100$ МПа.

5. Полученные экспериментальные данные ЭТ исследованных сухих и флюидонасыщенных пористых пород были использованы для проверки точности и прогнозирующей способности различных теоретических эмпирических и полуэмпирических моделей. Определены значения структурных параметров для пористой среды по данным ЭТ для ряда широко применяемых на практике теоретических моделей. Исследована зависимость структурных параметров от температуры и давления.
6. Получена новая полуэмпирическая (физически обоснованная) модель, с высокой точностью (0.5%) описывающая одновременное влияние температуры и давления на ЭТ. Модель содержит минимум параметров (два значения ЭТ при 0.1 МПа и при экстремально высоких давлениях, т.е. ЭТ скелета), которые легко могут быть определены по минимуму экспериментальных данных или оценены косвенным путем. Теоретические модели, описывающие зависимость ЭТ от пористости, могут быть модифицированы для описания зависимости ЭТ от давления путем учета влияния давления на пористость. Например, модель Zimmerman с учетом барической зависимости пористости позволяет предсказать значения ЭТ при высоких давлениях с точностью до 1 %.
7. Значения показателя степени n в законе Эйкина ($\lambda \propto T^n$) для маслонасыщенного песчаника меняются в зависимости от давления в пределах от 0.17 до 0.19, для сухого песчаника от 0.3 до 0.4, для водонасыщенного песчаника от 0.20 до 0.22.
8. Получена связь между транспортными (теплопроводностью) и термодинамическими (изотермической сжимаемостью, уравнением состояния) свойствами пород. Установлено, что экспериментальные данные ЭТ и модель Hofmeister'a могут быть использованы для определения уравнения состояния сухих и флюидонасыщенных пористых материалов, что позволит построить *PVT* диаграмму и рассчитать все термодинамические (равновесные) свойства.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

По списку ВАК:

1. Abdulagatov I.M., Emirov S.N., Abdulagatova Z.Z., Askerov S.Ya. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of rocks // J. Chem. Eng. Data, 2006. – V.51. – P.22-33.
2. Эмиров С.Н., Гаджиев Г.Г., Рамазанова Э.Н., Абдулагатова З.З., Магомедмирзоев Э.М. Исследования теплопроводности керамики SiC-BeO в условиях высоких давлений и температур // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – Т.71. – №2. – С.290-292.
3. Abdulagatova Z.Z., Abdulagatov I.M., Emirov S.N., Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone // International Journal of Rock Mechanics и Mining Sciences, 2009. – V.46 (6). – P.1055-1071.

4. Abdulagatova Z.Z., Abdulagatov I.M., Emirov S.N., Effect of pressure, temperature, and oil-saturation on the thermal conductivity of sandstone up to 250 MPa and 520 K // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (в печати).

В других изданиях:

5. Абдулагатова З.З., Эмиров С.Н., Абдулагатов И.М. Влияние температуры и давления на теплопроводность и скорость звука в андезитовых горных породах // *Ультразвук и термодинамические свойства веществ: Сборник научных трудов.* – Курск, 2006. – Вып.33. – С. 5-24.

6. Абдулагатова З.З. Исследование теплопроводности горных пород при высоких давлениях и температурах // *Вестник молодых ученых Дагестана.* – Махачкала, 2003. – С.127-130.

7. Эмиров С.Н., Гаджиев Г.Г., Рамазанова Э.Н., Абдулагатова З.З., Магомедмирзоев Э.М. Исследование теплопроводности керамики Si-BeO в условиях высоких давлений и температур // *Сборник трудов 8-го Международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-10): сб. научных трудов.* – Сочи, 2005. – Сочи. – Ч.1. – С 148-150.

8. Абдулагатов И.М., Эмиров С.Н., Абдулагатова З.З., Рамазанова Э.Н. Температурная и барическая зависимость теплопроводности песчаников в условиях высоких давлений и температур // *Материалы XI Российской конференции по теплофизическим свойствам вещества.* – Санкт-Петербург, 2005. – Т.2. – С. 10-11.

9. Эмиров С.Н., Гаирбеков Х.А., Рамазанова Э.Н., Абдулагатова З.З. Тепловые свойства некоторых горных пород при высоких давлениях и температурах // *Сборник трудов 8-го Международного симпозиума «Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах» ОМА-2005.* – Сочи. – Ч.II. – С. 919-202.

10. Рамазанова Э.Н., Эмиров С.Н., Абдулагатова З.З., Халилов А.Г. Исследование теплопроводности песчаника и алевролита при высоких давлениях и температурах. *Материалы Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы».* – Махачкала, 2005. – Т. 2. – С. 144-147.

11. Рамазанова Э.Н., Эмиров С.Н., Гаирбеков Х.А., Абдулагатова З.З. Тепловые свойства доломита и песчаника при высоких давлениях и температурах // *Сборник трудов Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах».* – Махачкала, 2005. – Т.2. – С. 273-276.

12. Рамазанова Э.Н., Эмиров С.Н., Гаирбеков Х.А., Абдулагатова З.З. Влияние давления и температуры на теплопроводность флюидонасыщенных горных пород // *Труды конф. ООО «Лукойл Волгоград Нипиморнефть».* – Волгоград, 2006. – С. 134-135.

13. Абдулагатова З.З., Абдулагатов И.М., Эмиров С.Н. Механизм переноса тепла в сухих и флюидонасыщенных пористых материалах. Эксперимент и модели / *Тез. докл. XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ.* – Москва, 2008. – С. 55-56.

Формат 69x84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Тир. 100 экз. Зак. 43. Отпечатано в ИП «Султанбегова Х.С.»
Махачкала, ул. М.Гаджиева, 34

