

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР.

С.Н.ЭМИРОВ, Э.Н.РАМАЗАНОВА

*Институт проблем геотермии ДНЦ РАН,
г. Махачкала, Россия, 367005, пр. И.Шамиля, 39^а.*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности флюидонасыщенных образцов песчаника при высоких гидростатических давлениях до 400 МПа и температурах (275-523К). Показано, что давление приводит к ослаблению температурной зависимости теплопроводности. Обсуждаются процессы, приводящие к дополнительному рассеянию тепловых волн в сложных неупорядоченных средах.

In operation effects (results) of experimental researches of a thermal conductivity флюидонасыщенных are submitted is model sandstone at high hydrostatic pressures up to 400 МПа and temperatures (275-523Ê). It is shown, that pressure gives in impairment of temperature dependence of a thermal conduction. The processes giving in an additional dispersion of thermal waves in the composite random mediums are discussed.

Теплопроводность является одним из важнейших теплофизических свойств полупроводников, диэлектриков и горных пород. Экспериментальные исследования температурной и барической зависимости теплопроводности позволяют получить ценную информацию не только о процессах распространения и рассеяния тепловых волн для теории теплопереноса в конденсированных средах, но и изучить тепловой режим земной коры.

Механизм переноса тепла в твердых телах, и особенно в горных породах, очень сложен даже при многих упрощениях и допущениях. Горная порода является многокомпонентной системой, состоящей из различных минералов с различным химическим составом, степенью кристаллизации, пористостью и формой пор, процесс теплопереноса в которых трудно поддается моделированию и теоретическому предсказанию. Поэтому достоверные и точные данные о теплопроводности горных пород и их зависимость от давления, температуры и флюидонасыщения очень важны для исследования и правильного понимания механизмов переноса тепла в недрах Земли, выявления их природы и построения моделей для их предсказания.

Учитывая актуальность подобных исследований, в 1965 году под руководством Х.И. Амирханова в Институте физики Дагестанского филиала АН СССР были начаты работы по созданию методики и разработке аппаратуры для экспериментальных исследований теплопроводности полупроводников в условиях высоких гидростатических давлений [1-4], которые в дальнейшем были продолжены в Институте проблем геотермии ДНЦ РАН [5,6,7] для исследования теплопроводности флюидонасыщенных горных пород.

Абсолютный стационарный метод плоского слоя [1,5,6], применяемый нами для исследования теплопроводности твердых тел, позволяет исследовать теплопроводность горных пород в условиях высоких давлений (до 400 МПа), температур (275-523 К) и флюидонасыщения.

Исследования температурной зависимости теплопроводности, начатые в работах Эйкина [8] и теоретически обоснованных в работах Дебая и Пайерлса [9], показали, что теплопроводность кристаллических твердых тел обратно пропорциональна температуре и описывается равенством:

$$\lambda = CT^{-n}, \quad (1)$$

где величина показателя степени $n \geq -1$ описывает перенос тепла в кристаллических веществах, $n = -0,5$ относится к кристаллическим веществам с большим количеством дефектов [10,11], $n = +0,5$ описывает перенос тепла в аморфных веществах [12].

Теоретически влияние давления на теплопроводность диэлектриков и горных пород большинство авторов [13,14] анализируют на основании формулы Лейбфрида – Шлеймана [15], которая показывает, что давление должно приводить к линейному росту теплопроводности. Однако, существующие в литературе результаты экспериментальных исследований по влиянию давления на теплопроводность горных пород [14,16,17,18], указывает на то, что линейная зависимость теплопроводности от давления встречается достаточно редко.

Нами для экспериментальных исследований были взяты два вида песчаников:

Песчаник-1. Месторождение Солончак, скважина-34, крупнозернистый, открытая пористость 13%, плотность $2,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Песчаник-2. Месторождение Буйнакский перевал, открытая пористость 16,2%, плотность $2,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Результаты экспериментальных исследований по влиянию гидростатического давления до 400 МПа в области температур 275-523 К на теплопроводность образцов песчаника-1 представлены на рисунке 1.

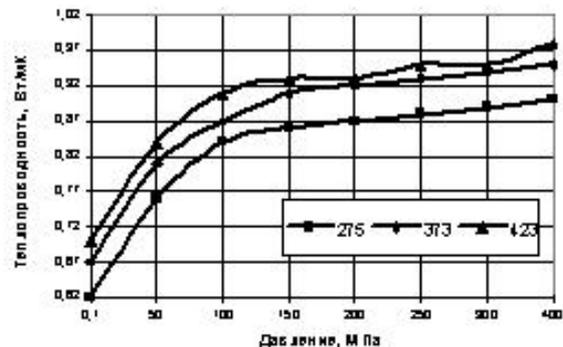


Рис.1 Зависимость теплопроводности (Вт/мК) песчаника-2 от давления при различных температурах

Полученные экспериментальные данные по исследованию температурной зависимости теплопроводности образцов песчаника-1 показывают, что рост температуры приводит к уменьшению его теплопроводности, что свидетельствует о том, что в структуре образца преобладает вещество в кристаллическом состоянии.

Для анализа полученных экспериментальных данных в данной работе представлена таблица 1 приведенных значений теплопроводности образцов песчаника-1 от температуры и давления, из которой видно, что его температурная зависимость при атмосферном давлении может быть описана уравнением (1), где $C=7,88$ Вт/м, а $n=0,19$. Учитывая, что показатель степени n в равенстве (1) является чувствительным параметром как к механизму рассеяния тепловых волн, так и к степени кристаллизации твердого тела можно предположить, что полученное низкое значение показателя степени $n<0,5$ свидетельствует о том, что порода, из которой состоит песчаник-1, частично содержит в своем составе вещество в аморфном состоянии [12].

С увеличением давления до 400 МПа теплопроводность песчаника-1 увеличивается в зависимости от температуры на 8-14%. Рост теплопроводности под давлением носит нелинейный характер и максимальное увеличение теплопроводности наблюдается в области до 100 МПа. Как видно из таблицы 1 гидростатическое давление значительно ослабляет температурную зависимость теплопроводности. Так наблюдаемое уменьшение теплопроводности с ростом температуры при атмосферном давлении от 16% уменьшается до 10% при давлении 400 МПа. При этом рост давления до 400 МПа приводит к нелинейному уменьшению показателя степени n в равенстве (1) от 0,19 до 0,13. Приведенные экспериментальные данные показывают, что влияние давления и температуры на теплопроводность образцов песчаника-1 могут быть описаны уравнением:

$$\lambda = C(P)T^{-n(P)}, \quad (2)$$

где значения $C(P)$ и $n(P)$ представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость теплопроводности (Вт/мК) песчаника: а- 1 от давления и температуры

Т, К	Давление, МПа									
	0,1	20	50	100	150	200	250	300	350	400
275	2,71	2,82	2,84	2,89	2,90	2,91	2,92	2,93	3,93	2,94
323	2,63	2,73	2,77	2,84	2,85	2,84	2,87	2,88	2,88	2,89
373	2,54	2,63	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	2,54	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
n	0,19	0,21	0,18	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
C,	7,88	9,68	7,92	6,57	6,57	6,52	6,79	6,42	6,29	5,23

Таблица 2.

Зависимость теплопроводности (Вт/мК) песчаника: а- 2 от давления и температуры

Т, К	0,1	50	100	150	200	250	300	400
газонасыщенный								
275	0,42	0,74	0,84	0,84	0,87	0,88	0,89	0,90
323	0,44	0,77	0,85	0,89	0,90	0,90	0,92	0,92
373	0,47	0,81	0,87	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
423	0,70	0,84	0,91	0,93	0,90	0,95	0,95	0,98
n	0,27	0,24	0,18					0,18
маслонасыщенный								
275	1,44	1,81	1,84	1,84	1,87	1,89		1,15
323	1,49	1,83	1,84	1,87	1,89	1,91		1,14
373	1,70	1,87	1,90	1,91	1,92	1,94		1,15
423	1,73	1,91	1,93	1,94	1,95	1,98		1,14
водонасыщенный								
275	2,23	2,43	2,44	2,47	2,48	2,50		1,11
323	2,24	2,44	2,44	2,48	2,49	2,51		1,11
373	2,27	2,45	2,44	2,49	2,50	2,53		1,11
423	2,30	2,48	2,48	2,52	2,53			1,11

Полученные экспериментальные данные по влиянию всестороннего давления до 250÷400 МПа на теплопроводность газо-, масло- и водонасыщенного песчаника-2 в интервале температур 273÷423 К представлены на рисунке 2 и в таблице 2. Незначительное увеличение теплопроводности образцов газонасыщенного песчаника-2 с ростом температуры на 5–10% свидетельствует о наличии в данном песчанике большого количества вещества в

аморфном состоянии [12]. Ввиду большой пористости (16.2%) насыщение песчаника-2 маслом увеличивает его теплопроводность в 2.5 раза, а водой – в 3.5 раза, при этом характер температурной зависимости почти не меняется.

Всестороннее давление (рис.2) приводит к нелинейной зависимости теплопроводности газо-, масло- и водонасыщенных образцов песчаника. В области давлений

0.1–100 МПа наблюдается интенсивный рост теплопроводности, переходящий в более слабую линейную зависимость. Степень роста теплопроводности под давлением в значительной мере зависит от вида насыщающего флюида. Так, всестороннее давление до 400 МПа увеличивает теплопроводность газонасыщенного песчаника на 40%, маслосыщенного на 17%, а водонасыщенного на 12%.

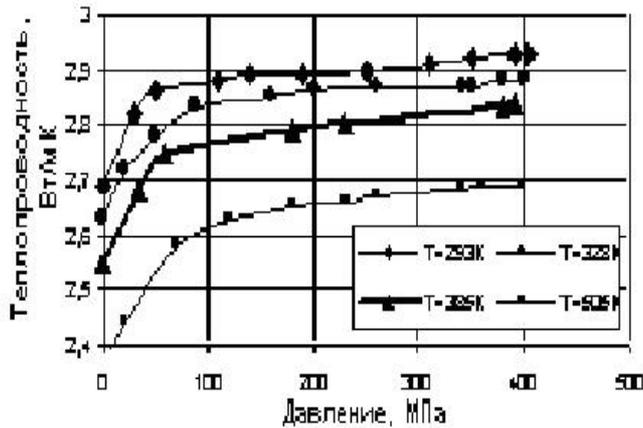


Рис.2 Зависимость теплопроводности (Вт/Мк) песчаника-1 от давления при различных температурах

Полученные экспериментальные данные показывают, что для флюидонасыщенных песчаников закономерности изменения теплопроводности от давления и температуры носят сложный характер и определяются в основном степенью кристаллизации аморфных породообразующих минералов, входящих в состав образцов.

Нелинейная зависимость λ от давления, полученная для образцов песчаников, как и результаты, полученные другими авторами [14,17,18], можно объяснить возникновением дополнительных процессов рассеяния тепловых волн в горных породах, как в веществе с неупорядоченной и блочной структурой. Литературные данные [19] позволяют предположить, что давление, с одной сторо-

ны, увеличивая частоту колебания атомов вещества (наклон дисперсной кривой), с другой стороны, приводит к процессу возникновения неравновесного возбужденного состояния границ блоков и зерен в поликристаллических соединениях [20]. Теоретически резонансное рассеяние тепловых волн на вибрациях дислокаций описано в работе [21].

Для выяснения причин, вызывающих нелинейный рост теплопроводности горных пород под давлением и процессы дополнительного рассеяния тепловых волн, был проведен анализ результатов экспериментальных исследований λ песчаников при повышении давления до 250 МПа и его обратного хода до 0,1 МПа при $T=\text{const}$, который показал, что давление не приводит к остаточным явлениям, влияющим на начальную величину λ и возникновению гистерезиса в барической зависимости λ . Отсутствие гистерезиса отмечено и в других работах [14,17,18].

Полученные экспериментальные данные по влиянию температуры и давления на теплопроводность флюидонасыщенных горных пород позволяют сделать следующие выводы:

1. Температурная зависимость теплопроводности образцов горных пород существенно зависит от степени кристаллизации породообразующих веществ.
2. Низкое значение показателя степени n указывают на то, что в данных горных породах тепловые волны испытывают достаточно сильное рассеивание на дефектах и структурных неоднородностях.
3. В горных породах с поликристаллическими свойствами всестороннее давление приводит к нелинейной зависимости теплопроводности и к процессам возникновения дополнительного рассеивания тепловых волн.
4. Всестороннее давление и флюидонасыщение приводят к повышению величины теплопроводности.
5. Рост теплопроводности под давлением тем больше, чем меньше теплопроводность насыщающего флюида.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 05-02-17586).

- [1]. Х.И.Амирханов, Я.Б.Магомедов, С.Н.Эмиров Влияние всестороннего давления на теплопроводность теллура // Физ.тв.тела.- 1973.- Т.5, в.5.- С.1512-1515.
- [2]. Ch.J.Amirkhanov, J.B. Magomedov, S.N.Emirov, A.B.Magomedov, M.I.Daunov. The effect of hydrostatic pressure on some kinetic properties of CdSnAs_2 High temperatures-High pressures.-1975.- 7(6).- P.690-691.
- [3]. Х.И.Амирханов, Я.Б.Магомедов, С.Н.Эмиров, Р.М.Гаджиева. Измерение теплопроводности $\text{Cd}_{0,28}\text{Hg}_{0,72}\text{Te}$ при гидростатическом давлении. Физ. тв. тела.-1975.-Т.17,в.10.-С.2938-2940.
- [4]. С.Н.Эмиров Влияние гидростатического давления на теплопроводность полупроводников. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. -Л. -1977. - 21с.
- [5]. И.М.Абдулагатов, С.Н.Эмиров, Т.А.Цомаева, Х.А.Гаирбеков, С.Я.Аскеров Теплопроводность пористого стекла при высоких давлениях и температурах. ЖТФ. 1998. Т.36. №3. С. 401-405.
- [6]. I.M.Abdulagatov, S.N.Emirov, T.A.Tsomaeva, Kh.A.Gairbekov, S.Ya.Askerov and M.A.Magomaeva. Thermal conductivity fused quartz and quartz ceramic at high temperatures and high pressure. // J.Phys. and Chem. of Solids. 2000, 61. P.779-787.
- [7]. С.Н.Эмиров Экспериментальные исследования теплопроводности полупроводников и горных пород при высоких давлениях и температурах. Автореф. дисс. док. техн.наук. – М.МЭИ. -1997.–49 с.
- [8]. A.Euchen, P.Debye Vortage unber die Kinetische Theorie der Materie und Electricitat.- Berlin, 1914.
- [9]. Р. Пайерлс Квантовая теория твердых тел.М.: И.Л., 1956. -324 с.
- [10]. P.S.Klemens Theory of the pressure dependence of the lattice thermal conductivity // Solid St. Physics.- 1958. Proc 7 Symposium on Thermo.

- [11]. *P.G. Klemens* Theory of Thermal Conductivity of dielectric solids: effect of defect and microstructure at high Temperatures.-Proc.7 symposium on Therm. Phys. properties. Hol., 1977. New-Jork. 1977, N4.
- [12]. *Дж.Займан* Электроны и фононы. М.: И.Л., 1962. - 1124 с.
- [13]. *O.Alm, G. Backstrom* Thermal Conductivity of KCl up to 19 kBar // J. of Physics and Chemistry of Solids.- 1974.-Vol.35.-N3-1. P.421-424.
- [14]. *K.Horai, J.Susaki* The effect of pressure on the thermal Conductivity of Silicate rocks up to 12 kBar.// Physics of the Earth and Planetary Interiors.- V.55. 1989
- [15]. *G.Leibfrid, E.Schloeiman* Nach. Acad. Wiss.Gotingen Nat. Physik. 1954., K.1. 2a. P.71-76.
- [16]. *П. Бриджмен* Физика высоких давлений. - М. Изд-во иностр. лит. 1939.- 409 с.
- [17]. *D.S.Hughes and F.Savin* Thermal Conductivity of Dielectric Solids at High Pressure // Phys.Rev.- 1967.-Vol 161.- N3.- P.861-863.
- [18]. *U.Seipold, W.Cutzeit, D.Stromeyer* Application of Pulse measuring techniques with cylindrical Sample Symmetry for determining the thermal Conductivity of rocks under high pressures. // Theoretical Experimental Investigations of Physical Properties of Rocks and Minerals under Extreme p, T - Conditions: Ed.by H.Stiller and M.P.Volarovich.- Akademie Verlag. Berlin. -1979. - P.155-162.
- [19]. *К.П.Родионов* Некоторые термодинамические свойства твердого тела под высоким давлением // Ж. техн. физ. -1956. -Том XXVI, в.2. С.375-378.
- [20]. *О.А.Кайбышев, Р.З.Валиев* Явление образования в поликристаллах неравновесных границ зерен при поглощении ими решеточных дислокаций.// Бюллетень. Открытия. Изобретения. 1988, №7, Диплом №339.
- [21]. *Toshiyuki Ninomiya*. Dislocation Vibration and Phonon Scattering. J. of the Phys. Soc. of Japan. Vol. 25, №3, 1968, P.830-840.

Received: 30.01.2007