

**Влияние давления и температуры на теплопроводность известняка**

к.т.н. доц. Рамазанова А.Э., к.ф.-м.н. доц. Магдиев А.М.  
Институт (филиал) ФБГОУ ВПО «Московский государственный  
машиностроительный университет (МАМИ)» в г. Махачкале РД  
89094811973, [ada\\_ram@mail.ru](mailto:ada_ram@mail.ru)

*Аннотация.* В работе приводятся результаты экспериментальных исследований эффективной теплопроводности газо-, водо- и маслонасыщенных образцов известняка в условиях высоких давлений до 400 МПа и температур в интервале (273–523)К. Показано, что давление приводит к нелинейному росту величины эффективной теплопроводности известняка и влияет на характер ее температурной зависимости.

*Ключевые слова:* горные породы, температура, давление, теплопроводность, насыщение, дефекты.

**Введение**

Формирование тепловых полей на поверхности Земли в основном обусловлено интенсивностью глубинных тепловых потоков, которые дают ценную информацию о глубинных разломах и бассейнах нефтегазовых и геотермальных месторождений.

Изучение закономерностей изменения тепловых свойств горных пород и минералов в условиях высоких давлений, температур и флюидонасыщения позволяют наиболее достоверно оценивать величину тепловых потоков и температур на различных глубинах и получить новые данные о закономерностях изменения теплофизических свойств горных пород и пористых сред в условиях их естественного залегания.

Одной из основных задач геофизических исследований является получение наиболее достоверной информации о физическом состоянии вещества, слагающего недра нашей планеты. Хотя для описания теплофизических свойств осадочных горных пород в термобарических условиях существует ряд теоретических моделей, особое значение придается результатам экспериментальных исследований при высоких давлениях и температурах.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств горных пород значительно расширяют представление о процессах распространения и рассеяния тепловых волн в сложных многокомпонентных средах, а также имеют важное значение как для теории теплопереноса, так и для практики их технического применения.

На больших глубинах сделать достоверный прогноз теплопереноса не представляется возможным из-за большого количества факторов, влияющих на теплопроводность многокомпонентной системы – горной породы. Механизм теплопереноса в твердых телах, и особенно в горных породах, очень сложен и зависит от давления, температуры, минералогического состава, плотности, пористости, структуры и геометрии пор, степени кристаллизации порообразующих минералов.

В горных породах давление, оказывая существенное влияние на кристаллическую решетку и, следовательно, на межатомные расстояния, приводит к росту максимальной частоты колебания атомов и связанной с ней характеристической температуры Дебая. Влияние давления на теплопроводность твердых тел многие авторы [1, 2] рассматривают, основываясь на формулу Лейбфрида-Шлемана:

$$\lambda = \text{const} \frac{M\alpha\theta^3}{\gamma^2 T}, \quad (2)$$

где:  $M$  – молекулярный вес,  $\alpha$  – постоянная решетки,  $\theta$  – характеристическая температура Дебая,  $\gamma$  – параметр Грюнайзена.

По данным работы [3] давление, увеличивая максимальную частоту колебания атомов

и наклон дисперсной кривой, должно приводить к линейному росту теплопроводности твердых тел. Однако достаточно большое количество экспериментальных данных [4-6] показывает, что теплопроводность твердых тел в поликристаллическом состоянии с блочной структурой под давлением интенсивно растет в начальной стадии, а затем стремится к насыщению.

Эксперимент на сегодня служит основным источником достоверной информации о тепловых свойствах горных пород. При измерении керновых образцов на лабораторных установках можно не только моделировать термодинамические условия залегания, но и создать экстремальные ситуации для прогнозирования в них тепловых и других физических параметров пород. Это позволяет изучать изменения характеристик при разработке месторождений нефти и газа, при воздействии на горные породы физических полей. Кроме того, только в лаборатории возможно комплексное определение петрофизических характеристик, детальное петрофизическое изучение зерна, получение надежных уравнений корреляции между различными свойствами.

Согласно существующим в настоящее время теориям теплопереноса в твердых телах [7-9] и экспериментальным данным температурная зависимость эффективной теплопроводности ( $\lambda_{эф}$ ) описывается уравнением:

$$\lambda_{эф} = CT^{-n}, \quad (1)$$

где:  $n = 1$  – для кристаллических соединений, у которых существует дальний порядок межатомных связей;  $n = 0.5$  – для кристаллических соединений с большим количеством дефектов;  $-0.3 \leq n \leq -0.5$  – для аморфных соединений, у которых отсутствует дальний порядок межатомных связей [10].

Интерес к теплопроводности известняка и другим видам горных пород вызван тем, что известняк является одним из основных в осадочном чехле Земли, расположенном ниже уровня грунтовых вод и находящимся в состоянии полного влагонасыщения.

Тепловые свойства известняка играют существенную роль в оценке теплового режима осадочных пород. Как следует из теории, если температурная зависимость теплопроводности в кристаллическом состоянии носит обратно пропорциональный характер, то в аморфных соединениях величина теплопроводности прямо пропорциональна температуре. Учитывая, что давление обычно приводит к росту величины теплопроводности твердых тел, то суммарное влияние температуры и давления на теплопроводность горных пород в кристаллическом и аморфном состояниях будет неоднозначным.

### Результаты эксперимента

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию эффективной теплопроводности газо-, водо- и маслонасыщенного известняка (м/р Республика Дагестан, плотность  $\rho=2.38$  г/см<sup>3</sup>, пористость  $k=5$  %, глубина залегания 2685 м) в различных термобарических условиях.

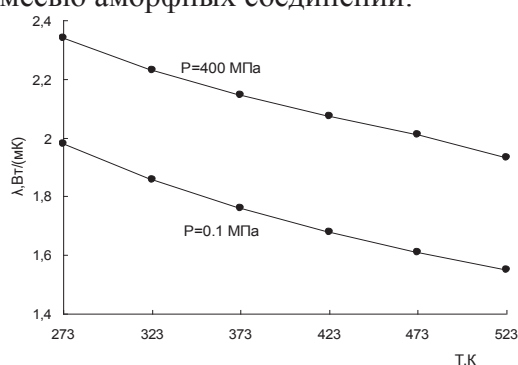
Для измерения теплопроводности использовали стационарный компенсационный метод плоских пластин [11, 12], погрешность составляет 5%. Измерения проводились в камерах высокого давления, где средой, передающей давление, служили газ аргон или касторовое масло. Гидростатическое давление создавалось с помощью газового компрессора польской фирмы "Unipress" GCA-10.

Результаты экспериментальных исследований по влиянию высоких температур 273-523К и давлений до 400 МПа на эффективную теплопроводность образцов известняка представлены в таблице и на рисунках 1 и 2.

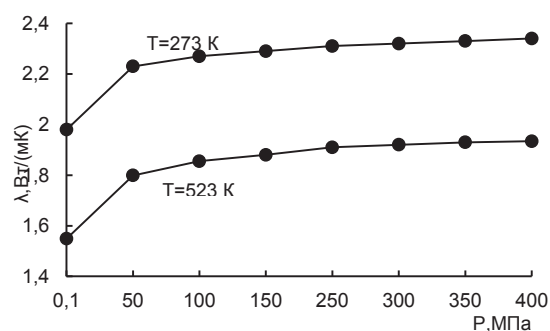
Как видно из рисунка 1 и таблицы эффективная теплопроводность образцов известняка обратно пропорциональна температуре и может быть описана уравнением (1), где значения  $n$  и  $C$  (Вт/м) приведены в таблице.

Уменьшение показателя степени  $n$  в (1) с возрастанием температуры указывает на то,

что известняк состоит в основном из кристаллических порообразующих соединений с примесью аморфных соединений.



**Рисунок 1. Зависимость теплопроводности газонасыщенного известняка от температуры при атмосферном давлении и 400 МПа**



**Рисунок 2. Зависимость теплопроводности известняка от давления при T=273 К и T=523 К**

Таблица 1.

**Зависимость теплопроводности (Вт/мК) известняка от температуры и давления**

T, К	P, МПа								
	0,1	50	100	150	200	250	300	350	400
<i>газонасыщенный</i>									
273	1.980	2.230	2.270	2.290	2.303	2.310	2.320	2.330	2.340
323	1.858	2.109	2.154	2.176	2.189	2.199	2.209	2.222	2.230
373	1.760	2.011	2.060	2.083	2.098	2.108	2.120	2.110	2.146
423	1.678	1.929	1.980	2.005	2.022	2.032	2.040	2.050	2.073
473	1.610	1.859	1.910	1.938	1.957	1.967	1.977	1.990	2.010
523	1.549	1.799	1.855	1.880	1.900	1.910	1.920	1.930	1.854
n	0.377	0.330	0.310	0.303	0.293	0.292	0.291	0.289	0.280
C	16.37	14.22	12.95	12.56	11.05	11.91	11.87	11.83	11.28
<i>маслонасыщенный</i>									
273	2.16	2.24	2.29	2.34	2.37	2.40	2.42	2.44	2.46
323	2.07	2.14	2.21	2.25	2.28	2.31	2.33	2.36	2.34
373	1.99	2.06	2.13	2.19	2.21	2.24	2.26	2.29	2.31
423	1.93	2.00	2.09	2.13	2.15	2.19	2.20	2.23	2.25
473	1.87	1.94	2.05	2.08	2.10	2.13	2.15	2.18	2.20
523	1.83	1.90	2.01	2.04	2.06	2.09	2.11	2.14	2.16
n	0.25	0.25	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20
C	9.03	9.29				7.91	7.89	7.56	7.55
<i>водонасыщенный</i>									
273	2.38	2.40	2.43	2.45	2.47	2.49	2.51	2.53	2.55
323	2.27	2.30	2.34	2.36	2.38	2.40	2.42	2.44	2.46
373	2.19	2.22	2.26	2.28	2.30	2.32	2.34	2.36	2.38
423	2.12	2.15	2.19	2.21	2.23	2.25	2.27	2.29	2.31
473	2.06	2.10	2.14	2.16	2.18	2.20	2.22	2.24	2.26
523	2.01	2.06	2.09	2.11	2.13	2.15	2.17	2.19	2.21
n	0.26	0.24	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22
C	10.23	9.35	8.92	8.89	8.86	8.84	8.81	8.79	6.48

Гидростатическое давление до 400 МПа приводит к нелинейному росту теплопроводности образцов известняка (рисунок 2), а именно, в начале наблюдается интенсивный рост, а

далее слабое линейное увеличение и плавный переход на насыщение, причем максимальный рост теплопроводности наблюдается до давлений  $p = 100$  МПа.

Давление значительно ослабляет температурную зависимость теплопроводности известняка и влияет на величину  $n$  и  $C$ , о чем свидетельствует уменьшение значения  $n$  от 0.38 при атмосферном давлении до 0.28 при  $p = 400$  МПа (таблица 1). Ослабление температурной зависимости  $\lambda_{эф}$  составляет 30%, что объясняется уменьшением процессов рассеяния тепловых волн.

Некоторые авторы [13-15] объясняют наблюдаемый интенсивный рост теплопроводности горных пород при давлениях до 100 МПа процессами захлопывания микропор, трещин и уплотнением зерен. Если исходить из данного объяснения, то при снижении давления должен наблюдаться гистерезис. Однако наши экспериментальные значения теплопроводности, полученные при подъеме и спуске давления, воспроизводились в пределах ошибки измерения и гистерезиса не наблюдалось. Как было сказано ранее, это можно объяснить возникновением под давлением дополнительного рассеяния тепловых волн.

Насыщение образцов известняка с открытой пористостью  $k = 5\%$  приводит к росту величины эффективной теплопроводности. Как видно из таблицы насыщение маслом увеличивает  $\lambda_{эф}$  на 5-7%, водой – на 11-15%. Рост  $\lambda_{эф}$  от давления существенно зависит от величины теплопроводности насыщающей жидкости. Для образца, насыщенного маслом, при давлении 400 МПа этот рост составляет 15-18%, а насыщенный водой – 8-10%.

### Выводы

1. Теплопроводность твердых тел является чувствительным параметром к наличию в них дефектов кристаллической решетки и описывается равенством:  $\lambda(T) = CT^{-n}$ , в котором знак и величина показателя степени  $n$  играют существенную роль в определении степени кристаллизации вещества.
2. Низкие значения показателя  $n = 0.2-0.4$  указывают на то, что в данных горных породах тепловые волны испытывают достаточно сильное рассеивание на дефектах и структурных неоднородностях.
3. Гидростатическое давление приводит к нелинейному росту теплопроводности глины. Максимальный рост теплопроводности наблюдается в области давлений 80-100 МПа. Ослабление роста эффективной теплопроводности образцов глины выше 100 МПа объясняется процессами дополнительного рассеяния тепловых волн.

### Литература

1. Оскотский В.С., Смирнов И.А. Дефекты в кристаллах и теплопроводность. М.: Наука, 1972. 159 с.
2. Horai K. Thermal Conductivity of rock-formed minerals // J.Geophys. Res.-1971. V.76. № 5. P. 1278-1308.
3. Alm O., Backstrom G. Thermal Conductivity of KCl up to 19 kBar // J. of Physics and Chemistry of Solids.1974. V.35. № 3-1. P. 421-424.
4. Anderson P., Backstrom G. Pressure Dependence of the Thermal Conductivity of Some Polyamides // Die Makromolekulare Chemic. 1976. V.177. P. 271-277.
5. Курбанов А.А. Теплопроводность газо-, водо- и нефтенасыщенных горных пород в условиях моделирующих глубинное залегание пластов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 9. С. 107-112.
6. Смирнов И.А., Шадричев Е.В. Теплопроводность теллура при высоких температурах.// ФТТ. 1962. 4. № 7. С. 1960-1963.
7. Euchen A., Debye P. Vortage unber die Kinetische Theorie der Materie und Electricitat.- Berlin, 1914.
8. Пайерлс Р. Квантовая теория твердых тел.М.: И.Л., 1956. 324 с.
9. Klemens P.S. Theory of the pressure dependence of the lattice thermal conductivity // Solid St.

---

Physics.-1958. Proc 7 Symposium on Thermo.

10. Петров А.А., Цыпкин Н.С., Селезнев В.Е. Общие закономерности теплопроводности решетки кристаллов при высоких температурах // Сборн. докл. V ECTDS. М., 1976. С. 1-3.
11. Амирханов Х.И., Магомедов Я.Б., Эмиров С.Н. Влияние всестороннего давления на теплопроводность теллура // ФТТ. 1973. Т.5. В.5. С. 1512-1515.
12. Эмиров С.Н. Рамазанова А.Э. Тепловые свойства твердых тел в условиях высоких давлений и температур. Ж. Мониторинг. Наука и технологии. 2009. № 1. С. 37-42.
13. Seipold U., Engler R. Investigation of the thermal conductivity of Jointed Granodiorites under Uniaxial Load and Hydrostatic Pressure. // Gerlands. Beitz. Geophysik Leipzig. 1981. 90. № 1. P. 65-71.
14. Воларович М.П., Баяк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях. М.: Наука, 1974. 223с.
15. Любимова Е.А. Термика Земли и Луны. М.: Наука, 1968. 279 с.