

## ВЛИЯНИЕ УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МИНЕРАЛАХ И СПЛАВАХ

С.Н. Эмиров<sup>1,2,\*</sup>, А.А. Аливердиев<sup>1,3</sup>, Р.М. Алиев<sup>2</sup>, Э.Н. Рамазанова<sup>2</sup>,  
Ю.П. Заричняк<sup>4</sup>, Б.А. Григорьев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*«Институт Проблем Геотермии и Возобновляемой Энергетики» – филиал «Объединённого Института высоких температур» Российской Академии Наук,  
39А пр. Шамиля, Махачкала, 367030 Россия;*

<sup>2</sup>*«Дагестанский Государственный Технический Университет»,  
70 пр. Шамиля, Махачкала, 367015 Россия;*

<sup>3</sup>*«Дагестанский государственный университет»,  
43А ул. М. Гаджиева, Махачкала, 367000 Россия;*

<sup>4</sup>*«Национальный Исследовательский Университет информационных технологий, механики и оптики»,*

*197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверский, д.49;*

<sup>5</sup>*ООО «Газпром ВНИИ ГАЗ», г. Москва, Россия,*

*\*E-mail: wtmirov@mail.ru*

## INFLUENCE OF STRUCTURE ORDERING, TEMPERATURE AND PRESSURE ON HEAT TRANSFER PROCESSES IN MINERALS AND ALLOYS

S.N. Emirov<sup>1,2,\*</sup>, A.A. Aliverdiev<sup>1,3</sup>, R.M. Aliev<sup>2</sup>, E.N. Ramazanova<sup>2</sup>  
Yu.P. Zarichnyak<sup>4</sup>, B.A. Grigoriev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*“Institute for Geothermal Researches and Renewable Energy” - a branch of “Joint Institute for High Temperatures” of Russian Academy of Sciences,  
39A Shamilya ave., Makhachkala, 367030 Russia;*

<sup>2</sup>*“Dagestan State Technical University”, 70 Shamilya ave., 367015 Makhachkala, Russia;*

<sup>3</sup>*“Dagestan State University”,*

*M. Gadzhieva Str. 43A, Makhachkala, 367000 Russia;*

<sup>4</sup>*“National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
49 Kronversky Ave., Saint Petersburg, 197101 Russia;*

<sup>5</sup>*Gazprom VNII GAZ LLC, Moscow, Russia,*

*\*E-mail: wtmirov@mail.ru*

В работе приведены результаты экспериментальных измерений эффективной теплопроводности образцов горной породы песчаника в области температур 273-523 К в условиях давлений 0.1-400 МПа. На основании анализа литературных данных и результатов экспериментальных измерений показано, что температурная зависимость неупорядоченных сред не подчиняется законам Эйкена и Дебая. Предложена математическая модель, описывающая степенной характер зависимости теплопроводности неупорядоченных сред от температуры и давления.

The paper presents the results of experimental measurements of the effective thermal conductivity of sandstone rock samples for the temperature range of 273-523 K under pressure conditions of 0.1-400 MPa. Based on the analysis of literature data and the results of experimental measurements, we have shown that the temperature dependence of disordered media does not obey the laws of Eucken and Debye. A mathematical model is proposed that describes the power-law nature of the dependence of the thermal conductivity of disordered media on temperature and pressure.

В упорядоченных минералах и сплавах с кристаллической структурой, где между атомами существуют дальние трансляционные связи, рост температуры приводит к достаточно

сильному рассеянию тепловых волн (трёхфононные процессы рассеяния фононов), и коэффициент эффективной теплопроводности ( $\lambda_{\text{эф}}$ ), может быть описан равенством Лейбфрида-Шлёмана [1,2]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \text{const} \frac{Ma\Theta^3}{\gamma^2 T}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – постоянная Грюнайзена,  $M$  – молекулярный вес,  $a$  – среднее межатомные расстояния,  $\Theta = h \cdot \nu_{\text{max}} / k$  – температура Дебая,  $\nu_{\text{max}}$  – максимальна (акустическая) частота колебания атомов.

В общем случае равенство (1) показывает, что температурная зависимость эффективной теплопроводности упорядоченных минералов и сплавов обратно пропорциональна температуре, т.е.  $\lambda_{\text{эф}}(T) \approx C \cdot T^{-1}$ .

Нарушение упорядоченности структуры минералов и сплавов, наличие границ блоков, дефектов и дислокаций приводит к значительному ослаблению процессов рассеяния тепловых волн. Теоретически ослабление температурной зависимости и отклонение от закона  $\lambda_{\text{эф}}(T) \approx C \cdot T^{-1}$  были рассмотрены в работах [3-5] и показано, что в неупорядоченных минералах и сплавах коэффициент эффективной теплопроводности ( $\lambda_{\text{эф}}$ ), может быть описан как:

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \sim T^{-0.5} \varepsilon^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – степень структурной разупорядоченности.

Таким образом, характер зависимости эффективной теплопроводности от температуры во многом зависит от механизма рассеяния фононов на фононах, рассеянием фононов на структурных неоднородностях, элементарных ячейках, границах блоков и степени структурной разупорядоченности.

В минералах и сплавах с аморфной структурой, где между атомами нет дальних трансляционных связей, эффективная теплопроводность слабо зависит от температуры. Работы [6,7] и обзор литературных и экспериментальных данных показывают, что температурная зависимость эффективной теплопроводности минералов и сплавов с нарушенной упорядоченностью (аморфной структурой) пропорциональна

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \approx C \cdot T^{-0.5}. \quad (3)$$

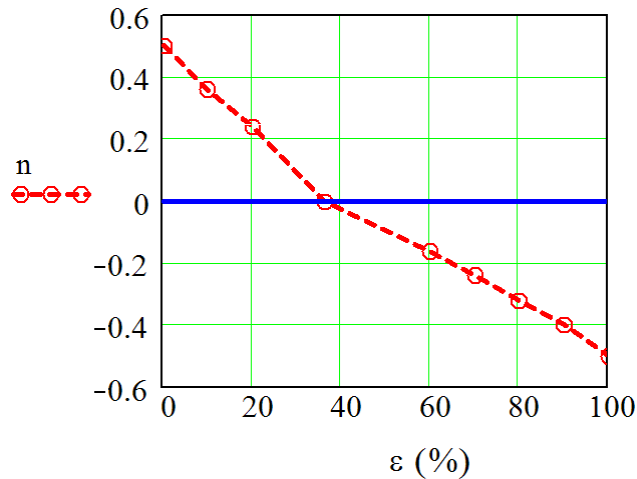
Равенство (1) с учётом различной степени упорядоченности структуры минералов и сплавов можно представить в виде равенства

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \approx C \cdot (T/T_0)^{-n}. \quad (4)$$

где  $C = \lambda_{\text{эф}}(T_0)$ ,  $n=-1$  – для упорядоченных минералов и сплавов,  $n=-0.5$  – для частично упорядоченных минералов и сплавов,  $n=0$  – для случая, когда степень разупорядоченность минералов и сплавов ( $\varepsilon=36.4\%$ ) [8,9],  $n=0.5$  – для случая, когда структура минералов и горных пород аморфная (отсутствуют дальние трансляционные связи между атомами).

Наши эксперименты данные [10,], как и данные многочисленных исследований [11-13], показывают, что температурная зависимость эффективной теплопроводности минералов и горных пород находится в основном в узкой области от  $\lambda \approx T^{-0.5}$  до  $\lambda \approx T^{+0.5}$  и может дать оценку их степени разупорядоченности. На рис. 1 представлена зависимость между степенью структурной разупорядоченности ( $\varepsilon$ ) и показателем степени ( $n$ ) в равенстве (4).

В данной работе приведены результаты экспериментальных измерений эффективной теплопроводности образцов песчаника (М.р. Солончак, РД. глубина залегания 5100 м,  $\rho=2.18 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $k=13\%$ ) в области температур (273-523 К) и гидростатического давления (0.1-400 МПа) абсолютным стационарным методом плоских пластин [14, 15].



**Рис. 1 (цветной on-line)** - Зависимость между степенью структурной разупорядоченности ( $\epsilon$ ) и показателем степени ( $n$ ) в равенстве (4)

Результаты измерений эффективной теплопроводности образцов песчаника в условиях высоких температур и давлений, представленные в таблице, и анализ литературных данных [16, 17] показывают, что под давлением эффективная теплопроводность горных породы и сплавов, имеющих сложную, блочную и неупорядоченную (аморфную и кристаллическую) структуру интенсивно увеличивается до 100 МПа, а далее наблюдается слабый рост. Согласно данным таблицы 1 и литературным данным [9, 10, 12, 15], давление влияет и на характер температурной зависимости эффективной теплопроводности и показатель степени ( $n$ ) в равенстве (4). Так, для песчаника при  $P=0.1$  МПа величина  $n = -0.21$ , а при  $P= 400$  МПа  $n=-0.18$ , что указывает на то, что под давлением меняется процесс переноса тепла в минералах игорных породах от волнового к активационному.

**Таблица 1:**

Зависимость теплопроводности (Вт/мК) песчаника от давления и температуры (М.р. Солончак РД, гл/з = 5100м,  $\rho = 2.18 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $k= 13\%$ ).

Т, С	Давление, МПа								
	0.1	50	100	150	200	250	300	350	400
273	2.75	2.84	2.87	2.89	2.91	2.92	2.93	2.94	2.95
323	2.65	2.75	2.78	2.80	2.82	2.83	2.84	2.85	2.86
373	2.57	2.67	2.71	2.73	2.75	2.76	2.77	2.78	2.79
423	2.51	2.61	2.65	2.67	2.68	2.69	2.70	2.72	2.73
473	2.45	2.55	2.60	2.62	2.63	2.64	2.65	2.67	2.68
523	2.40	2.50	2.54	2.57	2.58	2.59	2.61	2.62	2.63
$n$	-0.24	-0.20	-0.19	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18

Зависимость эффективной теплопроводности минералов и горных пород от степени структурной разупорядоченности, давления и температуры может быть описана равенством [17, 18] типа:

$$\lambda(T, P) = \lambda(T_0, P) \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{n(P)}. \quad (5)$$

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (20-08-00319А и 18-08-00059А).*

#### Список использованных источников:

1. *Лейбфрид Г.* Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов. М.:Физматгиз. 1963. 121с.
2. *Leibfrid G., Schloemann E.* Nach. Acad. Wiss. Gottingen Nat. Physik. 1954, K.1,2a, P. 71-76.
3. *Klemens P. G.* Theory of Thermal Conductivity of solids at high temperatures. High temperatures-High pressures. 1983. V.15. p. 249-254.
4. *Roufousse M., Klemens P, G.* Thermal Conductivity of complex dielectric crystals. 1973. J. Phys. Rev. B. V.7.P. 5379-5386.
5. *Klemens P.G.* Theory of the pressure dependence of the lattice Thermal Conductivity. "High Pressure Sci and Technol." Prog. 7<sup>th</sup> Int. AIRAPT Conf. 1979, Vol. 1. Oxford e.a.1980, 480 – 482.
6. *Займан Дж.* Электроны и фононы. М. ИЛ. 1962, 1124 с.
7. *Петров А.А., Цыпкина Н.С., Логачёв Ю.А.* Температурная зависимость щёлочно-галлоидных солей при повышенных температурах. ФТТ. 1974. С. 65-69.
8. *Садовский М.А.* Насушные задачи геофизики в комплексе наук о Земле. Вестник АН СССР. 1968. № 1.
9. *Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н.* Влияние давления и температуры на теплопроводность алевролита и доломита. Изв. РАН. 2012, Т. 76, № 1, с. 144-146.
10. *Абдулагатов И.М., Эмиров С.Н., Цомаева Т.А., Гаурбеков Х.А., Аскеров С.Я.* Теплопроводность пористого стекла при высоких давлениях и температурах. Теплофизика высоких температур. 1998. Т.36, № 3, с. 401-405.
11. *Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И., Буртный П.Я.* Петрофизические исследования при высоких РТ- параметрах и их геофизические приложения. Киев. Наукова думка. 1988. С. 248.
12. *Horai K., Susaki G.* 1989. The effect of pressure on the thermal conductivity of Silicate rocks to 12 kBar. Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989.V. 55, P. 292-305.
13. *Hofmaister A.M.* 2006. Phys. Chem. Miner. 33. 45.
14. *Emirov S.N.* Thermal conductivity of certain rocks under high pressure and temperatures. Higt Pressure Investigations in Geosciences. Chapter111. Thermal Properties.Berlin. 1089. P. 123-126.
15. *Addulagatova Z.Z., Abdalagatov I.M., Emirov S.N.* Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone. Inter. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2009. 46, 1055-1071.
16. *Huges D.S., Savin F.* Thermal Conductivity of Dielectric Solids at High Pressure. Phys. Rev. 1967. V.61. №3. P. 861.
17. *Emirov S.N., Beybalaev V.D., Amirova A.A., Ibragimov A.I., and Aliverdiev A.A.* Thermal Conductivity Temperature-Pressure Dependence of Rocks and Ceramics. Journal of Physics: Conf. Series, 2019, V. 1172, P. 012006
18. *Эмиров С.Н., Аливердиев А.А., Бейбалаев В.Д., Амирова А.А., Алиев Р.М., Давудов И.А.,* О температурных и барических зависимостях эффективной теплопроводности гранитов. Известия РАН: Серия физическая. 2020, Т. 84, № 9.