

УДК 536.21:592:621

О ВЛИЯНИИ УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МИНЕРАЛАХ И СПЛАВАХ

© 2021 г. С. Н. Эмиров^{1,2}, А. А. Аливердиев^{1,3, *}, Р. М. Алиев^{1,2}, Э. Н. Рамазанова²,
Ю. П. Заричняк⁴, Б. А. Григорьев⁵

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики –

филиал Объединенного Института высоких температур Российской академии наук, Махачкала, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Дагестанский государственный технический университет”, Махачкала, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Дагестанский государственный университет”, Махачкала, Россия

⁴Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский “Университет информационных технологий, механики и оптики”,
Санкт-Петербург, Россия

⁵Общество с ограниченной ответственностью “Научно-исследовательский институт природных газов
и газовых технологий – Газпром ВНИИ ГАЗ”, Москва, Россия

*E-mail: aliverdi@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Измерена эффективная теплопроводность образцов горной породы песчаника в области температур 273–523 К при давлении 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 эффективной теплопроводности неупорядоченных сред от температуры. Выявлена связь показателя этой зависимости со структурной разупорядоченностью.

DOI: 10.31857/S0367676521090106

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг и прогноз температурного поля в земной коре имеет большое значение во многих приложениях, связанных с изучением и освоением земных недр [1, 2]. Это, в свою очередь, требует глубокого понимания тепловых свойств горных пород в целом и их эффективной теплопроводности в частности. С другой стороны, описание температурно-барического поведения теплофизических свойств комплексных соединений, построение обобщающих моделей, позволяющих проводить прогнозирование и расчет эффективной теплопроводности в зависимости от структурной упорядоченности, имеет фундаментальное значение для физики конденсированного состояния.

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

рассеянию тепловых волн (трехфононные процессы рассеяния фононов) и коэффициент эффективной теплопроводности ($\lambda_{\text{эф}}$), может быть описан равенством Лейфрида–Шлеймана [3]:

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

где γ – постоянная Грюнайзена, M – молекулярный вес, a – среднее межатомное расстояние, $\Theta = \hbar v_{\text{max}}/k$ – температура Дебая, v_{max} – максимальна (акустическая) частота колебаний атомов.

В общем случае равенство (1) показывает, что температурная зависимость эффективной теплопроводности упорядоченных минералов и сплавов обратно пропорциональна температуре, т.е.

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \approx CT^{-1}.$$

Нарушение упорядоченности структуры минералов и сплавов, наличие границ блоков, дефектов и дислокаций приводит к значительному

Таблица 1. Теплопроводность (Вт/мК) песчаника в зависимости от давления и температуры (месторождение Акташ Республики Дагестан, глубина залегания – 2970 м, плотность – $2.7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, открытая пористость $k = 5\%$)

T, К	P, МПа								
	0.1	50	100	150	200	250	300	350	400
273	2.01	2.07	2.1	2.13	2.14	2.15	2.16	2.16	2.16
323	1.93	1.97	2.0	2.03	2.04	2.05	2.06	2.06	2.06
373	1.88	1.92	1.95	1.96	1.98	1.98	1.98	1.98	1.99
423	1.82	1.86	1.88	1.900	1.91	1.92	1.92	1.93	1.92
473	1.76	1.79	1.82	1.84	1.85	1.86	1.86	1.865	1.87
523	1.70	1.73	1.76	1.77	1.78	1.79	1.79	1.80	1.80
<i>n</i>	-0.26	-0.27	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28

ослаблению процессов рассеяния тепловых волн. Теоретически ослабление температурной зависимости и отклонение от закона $\lambda_{\text{эф}}(T) \approx CT^{-1}$ были рассмотрены в работах [4, 5] и показано, что в неупорядоченных минералах и сплавах коэффициент эффективной теплопроводности ($\lambda_{\text{эф}}$), может быть описан как

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

где ϵ – степень структурной разупорядоченности.

В аморфных и стеклообразных минералах и сплавах, где между атомами нет дальних трансляционных связей, эффективная теплопроводность слабо зависит от температуры. Обзор литературных данных [6–11] показывает, что для температурной зависимости эффективной теплопроводности минералов и сплавов для широкого круга горных пород и искусственных композитных материалов возможно следующее представление:

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \approx C(T/T_0)^n, \quad (3)$$

где $C = \lambda_{\text{эф}}(T_0)$, n – безразмерная величина, обычно лежащая в пределах от -0.5 до $+0.5$.

Выявлению связи показателя степени n с другими характеристиками композитного соединения был посвящен ряд наших недавних работ [8–10]. В данной работе приведены результаты экспериментальных измерений эффективной теплопроводности образцов песчаника (месторождение Акташ Республики Дагестан, глубина залегания 2970 м, плотность $2.7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, открытая пористость $k = 5\%$) в области температур (273–523 К) при значениях гидростатического давления 0.1–400 Мпа абсолютным стационарным методом плоских пластин [10]. Зависимость между величиной и знаком

n и степенью структурной разупорядоченности ϵ строится на основании как собственных, так и литературных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наших измерений, представленные в табл. 1, и анализ литературных данных [11–16], показывают, что под давлением эффективная теплопроводность горных породы и сплавов, имеющих сложную, блочную и неупорядоченную (аморфную и кристаллическую) структуру интенсивно увеличивается до давления 100 МПа, а далее наблюдается слабый рост. Согласно данным табл. 1 и литературным данным [12, 17] давление влияет и на характер температурной зависимости эффективной теплопроводности и показатель степени n в равенстве (3). Так для песчаника при $P = 0.1$ МПа величина $n = -0.26$, а при $P = 400$ МПа $n = -0.28$, что указывает на то, что под давлением меняется процесс переноса тепла [3, 4].

Многочисленные наши [8–10] и литературные [12–21] данные показывают, что $n = -1$ для упорядоченных минералов и сплавов, $n = -0.5$ – для частично упорядоченных минералов и сплавов, $n = 0$ – для случая, когда степень разупорядоченности минералов и сплавов ($\epsilon = 36.4\%$) [18], $n = 0.5$ – для случая, когда структура минералов и горных пород аморфная (отсутствуют дальние трансляционные связи между атомами). Итак, температурная зависимость эффективной теплопроводности минералов и горных пород находится в основном в узкой области от $\lambda \sim T^{-0.5}$ до $\lambda \sim T^{+0.5}$ и может давать оценку их степени разупорядоченности ϵ .

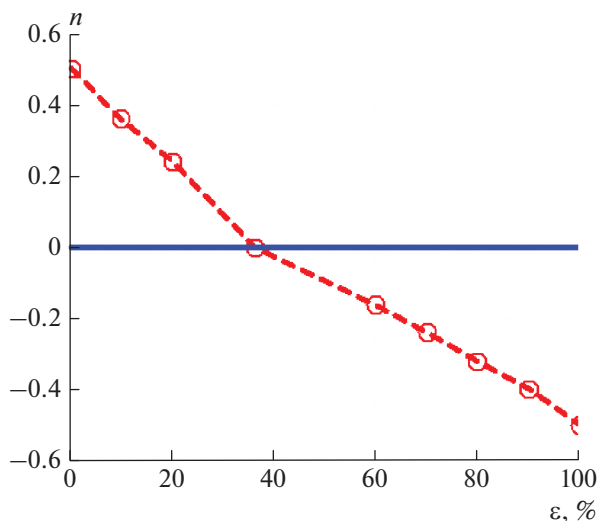


Рис. 1. Зависимость между степенью структурной разупорядоченности (ϵ) и показателем степени (n) в равенстве (4).

Оцененная таким образом зависимость ϵ от n , построенная на основе литературных данных [12–14, 19–21] представлена на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы экспериментальные температурно-барические зависимости эффективной теплопроводности образцов песчаника (месторождение Акташ Республики Дагестан). На основании как этих, так и опубликованных ранее исследований температурно-барического поведения эффективной теплопроводности горных пород и композитных материалов предложена зависимость между степенью структурной разупорядоченности и показателем степени в температурной зависимости эффективной теплопроводности.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации при поддержке РФФИ (проекты № 18-08-00059а и 20-08-00319а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun Q., Zhang W., Zhu Y., Huang Z. // Rock Mech. Rock Engin. 2019. V. 52. P. 2691.
2. Kämmlin M., Stollhofen H. // Geotherm. Energy. 2019. V. 7. Art. No. 13.
3. Leibfried G., Schloeman E. // Nach. Acad. Wiss. Göttingen. 1954. V. 11a. No. 4. P. 71.
4. Klemens P.G. // High Temp. High Press. 1983. V. 15. P. 249.
5. Roufosse M., Klemens P.G. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. Art. No. 5379.
6. Займан Дж. Электроны и фононы. М.: ИЛ., 1962. 1124 с.
7. Петров А.А., Цыпкина Н.С., Логачев Ю.А. // ФТТ. 1974. Т. 16. № 1. С. 65.
8. Emirov S.N., Beybalaev V.D., Amirova A.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1172. Art. No. 012006.
9. Эмиров С.Н., Аливердиев А.А., Бейбалаев В.Д. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 9. P. 1338; Emirov S.N., Aliverdiev A.A., Beybalaev V.D. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 9. P. 1144.
10. Emirov S.N., Aliverdiev A.A., Zarichnyak Yu.P., Emirov R.M. // Rock Mech. Rock Engin. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02353-3>
11. Norden B., Förster A., Förste H.-J., Fuchs S. // Geotherm. Energy 2020. V. 8. No. 1. P. 1.
12. Horai K., Susaki G. // Phys. Earth Planet Inter. 1989. V. 55. P. 292.
13. Hughes D.S., Savin F. // Phys. Rev. 1967. V. 61. No. 3. Art. № 861.
14. Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я. и др. Петрофизические исследования при высоких РТ-параметрах и их геофизические приложения. Киев: Наукова думка, 1988. С. 248.
15. Абдулагатов И.М., Эмиров С.Н., Цомаева Т.А. и др. // Теплофиз. высок. темпер. 1998. Т. 36. № 3. С. 401.
16. Fu H., Zhang B., Ge J. et al. // Amer. Mineral. 2019. V. 104. No. 11. P. 1533.
17. Hofmaister A.M. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. Art. No. 103532.
18. Садовский М.А. // Вестн. АН СССР. 1968. № 1. С. 59.
19. Albert Francis Birch A.F., Clark H. // Amer. J. Sci. 1940. V. 238. No. 8. P. 529.
20. Aurangzeb L.A., Khan A., Maqsood J. // J. Phys. D. 2007. V. 40. Art. No. 4953.
21. Merriman J.D., Hofmeister A.M., Derrick D.J., Whittington A.G. // Geosphere. 2018. V. 14. No. 4. P. 1961.

On the effect of structure ordering, temperature, and pressure on heat transfer processes in minerals and alloys

**S. N. Emirov^{a, b}, A. A. Aliverdiev^{a, c, *}, R. M. Aliev^{a, b}, E. N. Ramazanova^b,
Yu. P. Zarichnyak^d, B. A. Grigoriev^e**

^a*Institute for Geothermal Research and Renewable Energy, Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367030 Russia*

^b*Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367030 Russia*

^c*Dagestan State University, Makhachkala, 367025 Russia*

^d*National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, 197101 Russia*

^e*Gazprom VNII GAZ LLC, Moscow, Russia*

**e-mail: aliverdi@mail.ru*

We present 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. The relationship between the exponent of this dependence and the structural disorder is revealed.