УДК 536.21:592:621:622.241

О ТЕМПЕРАТУРНЫХ И БАРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЯХ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРАНИТОВ

© 2020 г. С. Н. Эмиров^{1, 2, *}, А. А. Аливердиев^{1, 3}, В. Д. Бейбалаев^{1, 3}, А. А. Амирова⁴, Р. М. Алиев^{1, 2}, И. А. Давудов²

¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур, 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 бюджетное учреждение науки "Институт физики имени Х.И. Амирханова" Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Махачкала, Россия

**E-mail: wemirov@mail.ru* Поступила в редакцию 19.03.2020 г. После доработки 10.04.2020 г. Принята к публикации 27.05.2020 г.

Проанализированы экспериментальные температурно-барические зависимости теплопроводности различных образцов гранита, полученные абсолютным стационарным методом при 273–523 К и 0.1–400 МПа. Установлен степенной характер температурной зависимости теплопроводности при фиксированном давлении с зависящими от давления коэффициентами.

DOI: 10.31857/S0367676520090136

введение

Граниты являются наиболее распространенными в континентальной земной коре кислыми полнокристаллическими магматическими горными породами, и представляют собой естественные композитные материалы с достаточно сложной структурой, в состав которой входят кварц, калиевый полевой шпат, кислый плагиоклаз, слюда и др. незначительные включения.

Процесс теплопереноса в твердых телах с упорядоченной кристаллической структурой носит волновой характер, описывается моделями Эйкина [1, 2] и Дебая [3] и имеет температурную зависимость $\lambda \sim T^{-1}$, в то время как процесс переноса тепла в твердых телах с аморфной структурой носит активационный характер (т.е. передача тепла от атома к атому) и имеет температурную зависимость $\lambda \sim T^{0.5}$. В неупорядоченных кристаллических твердых телах атомы занимают правильное положение в узлах кристаллической решетки, но порядок расположения атомов различных сортов не соблюдается, массы атомов и их силовые константы беспорядочно меняются от узла к узлу, что вызывает дополнительное рассеяние тепловых волн (фононов). Кроме того, значительное влияние на величину эффективной теплопроводности λ оказывают границы блоков и дефекты кристаллической решетки. При гидростатическом сжатии возникают внутренние напряжения, которые вызывают изменение ее объема и упругих параметров решетки. При этом под воздействием внутренних напряжений развиваются продольные и поперечные деформации. Все это приводит к сложному характеру процесса теплопереноса в многокомпонентных структурах со сложной и вариативной упорядоченностью [4]. Выявлению общих закономерностей таких процессов на примере гранитов и посвящена данная работа.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментального исследования температурно-барической зависимости эффективной теплопроводности в условиях высоких давлений нами были взяты природные образцы четырех гранитов: м/р р. Дагестан, глубина залегания 3020–3090 м, плотность 3.2 г/см³, пористость 1% (образец 1); м/р Кольский п/о, поверхностные отложения, плотность 2.54–2.57 г/см³, пористость 1– 2% (образцы 2–4). Измерения теплопроводности проводили абсолютным стационарным методом.



Рис. 1. Зависимости n(P), $\lambda(T_0, P)$ и $f_{T_0}(P)$ для образцов 1–4 при $T_0 = 523$ К.

Установка позволяла производить измерения при гидростатическом давлении до 400 МПа в диапазоне температур 273–523 К. Передающей давление средой служил газ аргон ($\lambda = 0.019 \frac{\text{BT}}{\text{M} \cdot \text{K}}$). Подробное описание установки приведено в [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные температурные зависимости теплопроводности показали, что степенная аппроксимация для всех образцов 1—4 практически идеальна и может быть представлена как:

$$\lambda(T, P) = \lambda(T_0, P) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n(P)}, \qquad (1)$$

где $\lambda(T_0, P)$ — барическая зависимость теплопроводности при фиксированной температуре T_0 , n(P) — барическая зависимость показателя степени.

С помощью безразмерной функции:

$$f_{T_0}(P) = \frac{\lambda(T_0, P)}{\lambda(T_0, 0)},\tag{2}$$

перепишем (1) в виде:

$$\lambda(T,P) = \lambda(T_0,0) f_{T_0}(P) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n(P)}.$$
(3)

Следуем отметить, что в рассматриваемом диапазоне давлений атмосферное давление 0.1 МПа близко к нулевому и с достаточно большой точностью обычно им можно пренебречь. Зависимости n(P), $\lambda(T_0, P)$ и $f_{T_0}(P)$ для гранитов 1–4 при $T_0 = 523$ К представлены на рис. 1. Безразмерная функция $f_{T_0}(P)$ удобна для сравнительного анализа различных материалов, абсолютные значения теплопроводности которых могут различаться более чем на порядок.

Приравняв найденные из уравнения (3) значения $\lambda(T, P)$ при использовании разных температур T_0 и

$$T_0^*$$
, получим $f_{T_0^*}(P) = f_{T_0}(P) \frac{\lambda(T_0,0)}{\lambda(T_0^*,0)} \left(\frac{T_0^*}{T_0} \right)^{n(r)}$. Для $P = 0$ очевидно $f_{T_0}(0) = f_{T_0^*}(0) = 1$, поэтому:

$$f_{T_0^*}(P) = f_{T_0}(P) \left(\frac{T_0^*}{T_0}\right)^{(n(P) - n(0))}.$$
 (4)

Формула (4) позволяет пересчитать экспериментальные зависимости $f_{T_0}(P)$ для любой другой температуры T_0^* , не обязательно равной одной из температур, для которой проводились непосредственные измерения.

Как видно из рис. 1*в*, несмотря на ощутимую разницу $\lambda(T_0, P)$ (см. рис. 1*б*), зависимости $f_{T_0}(P)$ для образцов 2–4 достаточно близки. В этой связи для дальнейшего анализа были выбраны образцы 1 и 2. Экспериментальные зависимости $f_{T_0^*}(P)$, пересчитанные к единой температуре $T_0 = 523$ K, для образцов 1 и 2 представлены на рис. 2*a* и 2*6*, соответственно. Как видно из рисунка, соответствующие экспериментальные точки с большой точностью совпадают, что дополнительно подтвер-

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 84 № 9 2020



Рис. 2. Зависимости $f_{T_0}(P)$, полученные при выборе различных температур T_0 (273, 323, 373, 423, 473, 523 K), пересчитанные к температуре $T_0^* = 523$ K для образцов 1 (*a*) и 2 (*б*).

ждает объективность степенной температурной зависимости (3).

Для образца 1, имеющего бо́льшую упорядоченность чем образец 2, зависимость $f_{T_0}(P)$ может быть с хорошей точностью представлена в виде:

$$f(P) = \left(\frac{1 + \alpha P / P_0^*}{1 + P / P_0^*}\right),$$
 (5)

где величина α имеет физический смысл отношения предельной теплопроводности к теплопро-

водности при нулевом давлении, а P_0^* — константа, имеющая размерность давления и определяющая крутизну наклона.

Уравнение (3) позволяет полностью описать зависимость $\lambda(T, P)$ по двум определенным экспериментально барическим зависимостям n(P) и $f_{T_0}(P)$, и коэффициенту $\lambda_0 = \lambda(T_0, 0)$ (теплопроводности при заданной температуре T_0 и нулевом давлении), не только внутри исследуемого экспериментально температурного диапазона, но и за его пределами.

Оценим границы возможной экстраполяции для гранита. В сторону более высоких температур она, по-видимому, правомерна, по меньшей мере, до окрестностей первого ожидаемого фазового перехода: α–β-перехода кварца, где его обычная форма с тригональной симметрией обратимо переходит в другую форму с гексагональной симметрией. Температура такого перехода составляет 845 К при атмосферном давлении и возрастает до 945 К при 375 МПа [6]. С другой стороны, необходимо принимать во внимание то, что температура плавления (в том числе частичного) сложного композитного соединения может понижаться с ростом давления, особенно при существенном флюидо- и влагонасыщении. Тем не менее, в очерченном диапазоне давлений (до 400 МПа) наличие экспериментальной температурной зависимости, снятой при атмосферном давлении, и достаточно хорошо подчиняющейся степенному закону до ~800-900 К (см., например, [7]), может позволить достаточно надежно оценить эффективную теплопроводность во всем диапазоне, использую барические зависимости n(P) и f(P) полученные при более низких температурах (~500 К). Большинство экспериментальных зависимостей n(P) и f(P) также допускают небольшую экстраполяцию в сторону высоких давлений. Следует особо отметить, что представление, подобное (5), достаточно хорошо отражает поведение $f_{T_0}(P)$ большей части, исследованных нами ранее композитных материалов. Тем не менее, для образца 2, температурная зависимость теплопроводности которого свидетельствует о меньшей кристаллической упорядоченности, зависимость $f_{T_0}(P)$ существенно отличается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа экспериментальных температурно-барических зависимостей теплопроводности, полученных абсолютным стационарным методом для четырех образцов гранита, предложено описание, позволяющее производить точный расчет теплопроводности во всем рассматриваемом диапазоне с возможной экстраполяцией в ближний регион. Входящие в данное описание безразмерные барические функции n(P) и f(P) позволяют сделать вывод о кристаллической упорядоченности образцов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты №№ 18-08-00059а и 20-08-00319а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Eucken A. // Annal. Phys. 1911. V. 339. № 2. P. 185.
- Eucken A. // Forsch. Gehiete Ingenieurue B3. 1932.
 V. 353. P. 16.
- 3. Debye P. // Annal. Phys. 1912. V. 344. № 14. P. 789.
- 4. Эмиров С.Н., Алхасов Ш.М., Бейбалаев В.Д. и др. // ТПТ. 2019. Т. 11. № 3. С. 34.
- Abdulagatova Z.Z., Abdulagatov I.M., Emirov S.N. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2006. V. 46. P. 1055.
- Shen A.H., Bassett W.A., Chou I.-M. // Amer. Mineral. 1993. V. 78. P. 694.
- Hartlieb P., Toifl M., Kuchar F. et al. // Miner. Engin. 2016. V. 91. P. 34.