

УДК 536.21:592:621

Экспериментальные и теоретические исследования коэффициента эффективной теплопроводности горных пород в условиях высоких давлений и температур

С.Н. Эмиров^{1*}, А.Э. Рамазанова¹, Д.К. Джаватов¹, В.Д. Бейбалаев², А.А. Амирова³, И.А. Давудов⁴, А.А. Аливердиев¹

¹ Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Российская Федерация, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 39а

² Дагестанский государственный университет, Российская Федерация, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43-а

³ Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, Российская Федерация, 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94

⁴ Дагестанский государственный технический университет, Российская Федерация, 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 70

* E-mail: wemirov@mail.ru

Тезисы. Представлены экспериментальные результаты определения эффективной теплопроводности горных пород андезитбазальта и амфиболита. Измерения проводили абсолютным стационарным методом в температурном диапазоне 273...523 К и при гидростатическом давлении до 400 МПа. Установлено, что температурная зависимость теплопроводности существенно зависит от степени кристаллизации породообразующих веществ.

Ключевые слова: горная порода, теплопроводность, температура, давление, тепловой поток.

Нефтегазовая отрасль имеет принципиальное значение в развитии общества XXI в. Роль энергоресурсов, предлагаемых данной промышленностью, трудно переоценить. Однако одной из задач рациональной и безопасной деятельности на всех этапах производственного цикла в нефтегазовой промышленности является постоянный мониторинг параметров системы «скважина – пласт», и в том числе температуры в призабойной зоне скважины.

Оценка и мониторинг температуры в призабойной зоне пласта имеют принципиальное значение на всех этапах работ – от бурения до промышленной эксплуатации. В частности, применительно к бурению данные о температуре играют определяющую роль в выборе промывочной жидкости. Температура оказывает существенное влияние на фильтрационные и реологические свойства бурового раствора и его вязкостные характеристики.

Для оценки температуры и таких теплофизических параметров, как эффективная теплопроводность горной породы ($\lambda_{эф}$), плотность теплового потока (q), скорость продольных ультразвуковых волн на различных глубинах земной коры (v), градиент температуры в призабойной зоне скважины ($grad T$) и т.д., в основном пользуются уравнениями Фурье

$$q = -\lambda_{эф} grad T \quad (1)$$

и Дагдела – Макдональда [1]

$$\lambda_{эф}(T) = \frac{1}{3} \frac{av}{\chi \gamma^2 T}, \quad (2)$$

где a – температуропроводность; $\chi = -V dP/dV$ – сжимаемость, или изотермический модуль сжимаемости (V – объем, P – гидростатическое давление); γ – параметр Грюнейзена. Формулы (1), (2) показывают, что между v и $\lambda_{эф}$ существует прямая корреляционная связь.

Результаты экспериментальных измерений, проведенных абсолютным стационарным методом плоских пластин [2] в условиях высоких гидростатических давлений до 400 МПа и температур (273...523 К), свидетельствуют, что $\lambda_{эф}$ является чувствительным параметром, зависящим не только от давления и температуры, но и от степени кристаллизации породообразующих минералов. Так, процесс переноса тепла в твердых диэлектриках и горных породах с упорядоченной кристаллической структурой, имеющей дальние трансляционные межатомные связи, имеет волновую природу, и $\lambda_{эф}$ описывается моделями Эйкана [3] и Дебая [4]: $\lambda_{эф}(T) \approx T^{-1}$. Процесс переноса тепла в твердых телах с аморфной структурой имеет активационный характер и $\lambda_{эф}(T) \approx T^{0,5}$. В горных породах, имеющих разную степень кристаллизации породообразующих минералов, теплоперенос носит смешанный характер, и температурная зависимость в этом случае находится в пределах от $\lambda_{эф}(T) \approx T^{-0,5}$ до $\lambda_{эф}(T) \approx T^{0,5}$ [5, 6].

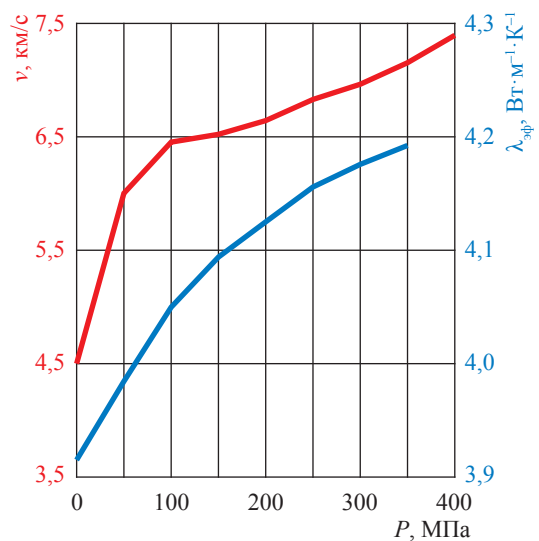
В статье представлены результаты экспериментальных измерений влияния высоких гидростатических давлений и температур на эффективную теплопроводность образцов следующих горных пород:

- кальцинированного окварцованного андезитбазальта из Саатлинской скважины (глубина залегания – 6240 м, пористость $\approx 1\%$, плотность – $2,54 \cdot 10^3$ кг/м³);
- амфиболита из Кольской сверхглубокой скважины (глубина залегания – 10000 м, пористость $\approx 1\%$, плотность – $2,61 \cdot 10^3$ кг/м³).

Результаты экспериментальных измерений влияния гидростатического давления до 400 МПа в области температур 273...523 К на эффективную теплопроводность образцов

андезитбазальта представлены в табл. 1 и на рисунке. По данным эксперимента, температура при $P = 0,1$ МПа слабо влияет на $\lambda_{эф}$ образцов и может быть описана как $\lambda_{эф}(T) \approx T^{0,05}$, что указывает на содержание в исследованных образцах в большом количестве пород с аморфной структурой. Существует ряд горных пород, не зависящих от температуры [7–9].

Гидростатическое давление приводит к нелинейному росту $\lambda_{эф}$ (см. рисунок, табл. 1), при этом ее наиболее интенсивный рост происходит в области давлений до 100...150 МПа, а далее ослабевает. При повышении давления до 350 МПа и последующем уменьшении до 0,1 МПа в измерениях $\lambda_{эф}$ гистерезиса не возникает.



Зависимость эффективной теплопроводности андезитбазальта и скорости распространения продольных ультразвуковых волн в нем от давления

Таблица 1

Теплопроводность, Вт·м⁻¹·К⁻¹, образцов окварцованного андезитбазальта:
 λ_{350}, λ_0 – теплопроводность материала при $T = 350$ °С и $T = 0$ °С соответственно

		P, МПа							
		0,1	50	100	150	200	250	300	350
T, К; $\frac{\lambda_{350}}{\lambda_0}$	273; 1,07	3,90	3,97	4,03	4,08	4,11	4,14	4,16	4,17
	323; 1,07	3,93	4,00	4,07	4,11	4,14	4,17	4,19	4,21
	373; 1,09	3,96	4,03	4,11	4,14	4,17	4,20	4,23	4,25
	423; 1,07	3,99	4,05	4,14	4,17	4,20	4,23	4,26	4,28
	473; 1,08	4,01	4,07	4,17	4,19	4,22	4,25	4,28	4,31
	523; 1,08	4,03	4,09	4,19	4,21	4,24	4,27	4,31	4,33
Показатель степени температуры n		0,052	0,045	0,06	0,05	0,05	0,048	0,054	0,059
Коэффициент C, Вт·м ⁻¹		2,91	3,07	2,85	3,08	3,11	3,14	3,07	2,99

Таблица 2

Скорость распространения продольных ультразвуковых волн в образцах окварцованного андезитобазальта, км/с, при $T = 300$ К [10]

P, МПа								
0,1	50	100	150	200	250	300	350	400
5,00	5,75	5,98	6,01	6,07	6,17	6,23	6,32	6,45

Таблица 3

Зависимость теплопроводности, Вт·м⁻¹·К⁻¹, образцов амфиболита от гидростатического давления и температуры

		P, МПа								
		0,1	50	100	150	200	250	300	350	400
T, К	275	3,52	3,78	3,89	3,91	3,93	3,95	3,97	3,99	4,01
	323	3,02	3,29	3,39	3,4	3,42	3,44	3,46	3,48	3,5
	373	2,63	2,91	3,04	3,06	3,08	3,1	3,12	3,14	3,14
	423	2,35	2,58	2,7	2,75	2,78	2,81	2,83	2,85	2,85
	473	2,1	2,38	2,5	2,55	2,62	2,66	2,7	2,68	2,64
	523	1,89	2,23	2,34	2,4	2,45	2,5	2,5	2,5	2,5
n		0,95	0,81	0,78	0,75	0,72	0,7	0,71	0,71	0,72
C, Вт·м ⁻¹		753	359	312	264	232	205	215	225	236

Учитывая, что между $\lambda_{эф}$ и ν существует прямая корреляционная связь (формула (2)), в табл. 2 (см. также рисунок) приведены результаты измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн $\nu(P, T)$ в образцах окварцованного андезитобазальта [10].

Результаты экспериментальных изменений влияния гидростатического давления до 400 МПа и температуры в диапазоне 273...523 К на $\lambda_{эф}$ образцов горной породы амфиболита (табл. 3) показывают следующее:

1) давление приводит к нелинейному росту $\lambda_{эф}$ амфиболита на 14...15 %, при этом наиболее интенсивный рост происходит в области давлений до 100 МПа, а далее ослабевает;

2) давление влияет на характер температурной зависимости $\lambda_{эф}$ образцов амфиболита. Так, если $\lambda_{эф}(T) \approx T^{-0,95}$ при $P = 0,1$ МПа, то при $P = 400$ МПа $\lambda_{эф}(T) \approx T^{-0,72}$ (см. табл. 3);

3) зависимость эффективной теплопроводности амфиболита от давления и температуры описывается равенством $\lambda_{эф}(P, T) = C(P)T^{-n-\beta P}$, где $\beta = dn/dP$ – барический коэффициент показателя степени температуры. Полученное значение $n = 0,95$ указывает на то, что образец амфиболита представляет полностью окристаллизованную горную породу;

4) при повышении и понижении давления гистерезис отсутствует.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-08-00059а.

Список литературы

- Dugdale J.S. Lattice thermal conductivity / J.S. Dugdale, D.K. MacDonald // Phys. Rev. – 1955. – Т. 98. – № 6. – С. 1751–1752.
- Эмиров С.Н. Экспериментальные исследования теплопроводности полупроводников и горных пород при высоких давлениях и температурах: дис. ... д-ра тех. наук: 01.04.14 / С.Н. Эмиров; Ин-т проблем геотермии ДНЦ РАН. – Москва: МЭИ, 1997. – 39 с.: ил. – РГБ ОД, 9 98-2/2001-5.
- Eucken A. Über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fester Nichtmetalle / A. Eucken // Ann. Phys. – 1911. – Т. 34. – № 2. – С. 13–45; электронная версия: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19113390202>, Т. 339, № 2, С. 185–221.
- Debye P. Zur Theorie der spezifischen Warmen / P. Debye // Ann. Phys. – 1912. – Т. 344. – № 14. – С. 789–839. – <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19123441404>
- Klemens P.G. Decay of high-frequency longitudinal phonons / P.G. Klemens // J. Appl. Phys. – 1967. – № 38. – С. 4573.
- Рамазанова А.Э. Влияние давления и температуры на теплопроводность алевролита и доломита / А.Э. Рамазанова, С.Н. Эмиров // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 1. – С. 144–146.
- Horai K. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar / K. Horai, G. Susaki // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1989. – № 55. – С. 292.

8. Кларк С., мл. Справочник физических констант горных пород / С. Кларк мл. – М.: Мир, 1969. – 543 с.
9. Эмиров С.Н. Экспериментальные исследования процессов теплопереноса на границах зерен в упорядоченных и неупорядоченных средах / С.Н. Эмиров, А.Э. Рамазанова // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – № 71. – С. 317.
10. Efimova G.A. Spectral approach to determination of longitudinal elastic wave attenuation in rock at pressures up to 1.5 GPa / G.A. Efimova, J.V. Zhukov, V.A. Kalinin // High Pressure Investigations in Geosciences. – Berlin: Akademie-Verlag, 1989. – С. 9–14.

Experimental and theoretical studies of the effective thermal conductivity of rocks in conditions of high pressures and temperatures

S.N. Emirov^{1*}, A.E. Ramazanova¹, D.K. Dzhavatov¹, V.D. Beybalayev², A.A. Amirova³, I.A. Davudov⁴, A.A. Aliverdiyev¹

¹ Institute for Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center of RAS, Bld. 39a, Prospect Imama Shamilya, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367030, Russian Federation

² Dagestan State University, Bld. 43-a, Gadzhiev street, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russian Federation

³ Amirkhanov Institute of Physics, Dagestan Scientific Center of RAS, Bld. 94, M. Yaragskogo street, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367015, Russian Federation

⁴ Dagestan State Technical University, Bld. 70, Prospect Imama Shamilya, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367026, Russian Federation

* E-mail: wemirov@mail.ru

Abstract. The paper reveals absolute stationary measurements of thermal conductivity for andesite-basalt and amphibolite rocks conducted in the temperature range of 273–523 K and under the hydrostatic pressure up to 400 MPa. It was found that the temperature-conductivity correlation considerably depended on the crystallinity of a rock-building matter.

Keywords: rock, thermal conductivity, temperature, pressure, heat flow.

References

1. DUGDALE, J.S., D.K. MACDONALD. Lattice thermal conductivity. *Phys. Rev.* 1955, vol. 98, no. 6, pp. 1751–1752.
2. EMIROV, S.N. *Experimental research of semiconductors and rock heat conductivity under high pressures and temperatures* [Eksperimentalnyye issledovaniya teploprovodnosti poluprovodnikov i gornyykh porod pri vysokikh davleniyakh i temperaturakh]: Dr. thesis (engineering). Institute for Geothermal Research of the Dagestan Scientific Center of RAS. Moscow, 1997. (Russ.).
3. EUCKEN, A. Über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fester Nichtmetalle. *Ann. Phys.* 1911, vol. 34, no. 2, pp. 13–45. ISSN 0003-3804. (Germ.). Available from online archive: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19113390202> (vol. 339, is. 2, pp. 185–221).
4. DEBYE, P. Zur Theorie der spezifischen Warmen. *Ann. Phys.* 1912, vol. 344, no. 14, p. 789. ISSN 0003-3804. (Germ.). Available from online archive: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19123441404>
5. KLEMENS, P.G. Decay of high-frequency longitudinal phonons. *J. Appl. Phys.* 1967, no. 38, pp. 4573. ISSN 0021-8979.
6. RAMAZANOVA, A.E., S.N. EMIROV. Impact of pressure and temperature to thermal conductivity of siltstones and dolomites [Vliyaniye davleniya i temperatury na teploprovodnost alevrolita i dolomita]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya.* 2012, vol. 76, no. 1, pp. 144–146. ISSN 0367-6765. (Russ.).
7. HORAI, K., G. SUSAKI. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar. *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 1989, no. 55, pp. 292. ISSN 0031-9201.
8. CLARK, S.P., jr. *Handbook of physical constant* [Spravochnik fizicheskikh constant gornyykh porod]. Translated from English. Moscow: Mir, 1969. (Russ.).
9. EMIROV, S.N., A.E. RAMAZANOVA. Experimental studies of heat transfer processes at the grain margins in patterned and not-patterned environments [Eksperimentalnyye issledovaniya protsessov teploperenosa na granitsakh zeren v uporyadochennykh i neuporyadochennykh sredakh]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya.* 2013, no. 71, pp. 317. ISSN 0367-6765. (Russ.).
10. EFIMOVA, G.A., J.V. ZHUKOV, V.A. KALININ. Spectral approach to determination of longitudinal elastic wave attenuation in rock at pressures up to 1.5 GPa. In: *High Pressure Investigations in Geosciences.* Berlin: Akademie-Verlag, 1989, pp. 9–14.