

УДК 536.21

**О ТЕМПЕРАТУРНЫХ И БАРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

**С.Н.Эмиров, В.Д.Бейбалаев\*, А.Э.Рамазанова, Г.Г.Гаджиев\*\*, А.А.Амирова\*\*, А.А.Аливердиев**

**ON THE TEMPERATURE AND PRESSURE LAWS GOVERNING CHANGES  
IN THE THERMAL CONDUCTIVITY OF ROCKS**

**S.N.Emirov, V.D.Beibalaev\*, A.E.Ramazanova, G.G.Gadzhiev\*\*, A.A.Amirova\*\*, A.A.Aliverdiev**

*Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, Махачкала  
\*Дагестанский государственный университет, Махачкала  
\*\*Институт физики ДНЦ РАН, Махачкала*

На основе экспериментальных измерений, проведенных абсолютным стационарным методом, получены данные о влиянии температуры (273-523 К) и гидростатического давления (до 400 МПа) на теплопроводность образцов песчаника и мергеля. В обоих случаях установлен степенной характер температурной зависимости теплопроводности при фиксированном давлении на всем исследуемом диапазоне давлений (с разными знаками степенного показателя). Предложено описание данной зависимости, по экспериментальным данным вычислены входящие в уравнение величины. Установлено, что под действием гидростатического давления у обоих горных пород интенсивный рост теплопроводности происходит в основном до 100 МПа (что сопровождается достаточно существенным изменением степенного показателя), а далее плавно переходит на насыщение.

**Ключевые слова:** *теплопроводность, горные породы, высокие давления*

Data on the effect of temperature (273-523 K) and hydrostatic pressure (up to 400 MPa) on the thermal conductivity of sandstone and marl samples were obtained on the basis of experimental measurements carried out by an absolute steady-state method. In both cases, a power-law character of the temperature dependence (with different signs of the power exponent) of the thermal conductivity at a fixed pressure is established over the entire range of pressures. A description of this dependence is proposed, the factors entering into the equation are calculated from the experimental data. It has been established that under hydrostatic pressure in both rocks the intensive growth of thermal conductivity occurs mainly up to 100 MPa (which is accompanied by a sufficiently significant change in the exponent), and then smoothly passes to saturation.

**Keywords:** *thermal conductivity, rocks, high pressures*

## 1. Введение

Процесс переноса тепла 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. Таким образом, в неупорядоченных структурах массы атомов и их силовые константы беспорядочно меняются от узла к узлу, что вызывает дополнительное рассеяние тепловых волн (фононов). Такие вещества являются переходными между кристаллическими и аморфными твердыми телами, которые от первых сохранили правильную решетку, а от вторых они имеют неупорядоченный характер расположения атомов разных сортов в узлах этой решетки. Кроме того, значительное влияние на величину  $\lambda$  эффективной теплопроводности оказывают границы блоков и дефекты кристаллической решетки. Поэтому процесс переноса тепла в неупорядоченных структурах носит сложный характер. Тем не менее, анализ экспериментальных и теоретических работ, по влиянию температуры на теплопроводность диэлектриков и горных пород [4-13 и др.] показывает, что температурная зависимость теплопроводности горных пород хорошо описывается степенным законом:

$$\lambda(T) = \text{const} \cdot T^n, \quad (1)$$

причем показатель степени  $n$  обычно находится в достаточно узкой области от  $\lambda \sim T^{0,5}$  до  $\lambda \sim T^{+0,5}$ . В литературе существуют примеры, когда  $\lambda(T)$  таких пород, как андезит, обсидиан, пироксен, базальт и др. [6-8] в области температур от (273-523) К не меняется с ростом температуры (т.е.  $\lambda \sim T^0$ ). В общем случае,

по величине и знаку ( $\pm$ ) показателя степени равенства (1) можно дать оценку структуре исследуемого материала.

При гидростатическом сжатии в горной породе возникают внутренние напряжения сложного характера, которые вызывают изменение ее объема и упругих параметров решетки. При этом в горных породах под воздействием внутренних напряжений развиваются продольные и поперечные деформации. Учет и описание влияния высокого давления на теплофизические свойства горных пород имеет большое как фундаментальное, так и прикладное значение, что делает актуальной тему данной работы.

## 2. Эксперимент

Для экспериментального исследования температурной зависимости теплопроводности в условиях высоких давлений нами были взяты природные образцы мелкозернистого песчаника (Россия, Республика Дагестан, глубина залегания 4495-4900 м, открытая пористость  $K = 7\%$ ; плотность  $\rho = 2,28 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), демонстрирующего отрицательный фактор  $n$  в формуле (1) и образцы мергеля (Сухокумское нефтегазовое месторождение, скважина №22, глубина залегания — 3815 м, пористостью  $K = 11,3\%$  и плотностью  $\rho = 2,57 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), демонстрирующего положительный степенной фактор.

Измерения теплопроводности в зависимости от гидростатического давления до 400 МПа в области температур 273-523 К проводились абсолютным стационарным методом, описанным в наших работах [7,12], в камере высокого давления, где средой, передающей давления, служит газ аргон ( $\lambda = 0,019 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ).

## 3. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных измерений при гидростатическом давлении до 400 МПа в области температур 273-523 К для песчаника и мергеля представлены в таблице и частично проиллюстрированы рис.1.

Как видно из рис.1, температурная зависимость теплопроводности песчаника и мергеля при

Зависимость теплопроводности (Вт/м·К) от температуры и давления

T, К	Давление МПа								
	0,1	50	100	150	200	250	300	350	400
Песчаник									
273	2,05	2,21	2,23	2,26	2,27	2,277	2,283	2,288	2,292
323	1,93	2,14	2,15	2,18	2,19	2,20	2,21	2,215	2,22
373	1,84	2,059	2,10	2,12	2,13	2,14	2,15	2,155	2,16
423	1,766	2,02	2,04	2,06	2,08	2,09	2,097	2,104	2,109
473	1,702	1,94	2,00	2,02	2,035	2,044	2,052	2,059	2,065
523	1,647	1,92	1,95	1,97	1,98	2,004	2,013	2,02	2,026
Мергель									
273	1,63	1,82	1,98	2,04	2,07	2,09	2,11	2,13	2,15
323	1,75	1,93	2,10	2,16	2,19	2,21	2,23	2,25	2,27
373	1,85	2,03	2,20	2,27	2,30	2,32	2,34	2,36	2,38
423	1,94	2,12	2,30	2,37	2,40	2,42	2,44	2,46	2,48
473	2,02	2,21	2,39	2,46	2,49	2,5	2,53	2,55	2,57
523	2,10	2,29	2,47	2,55	2,58	2,60	2,62	2,645	2,66

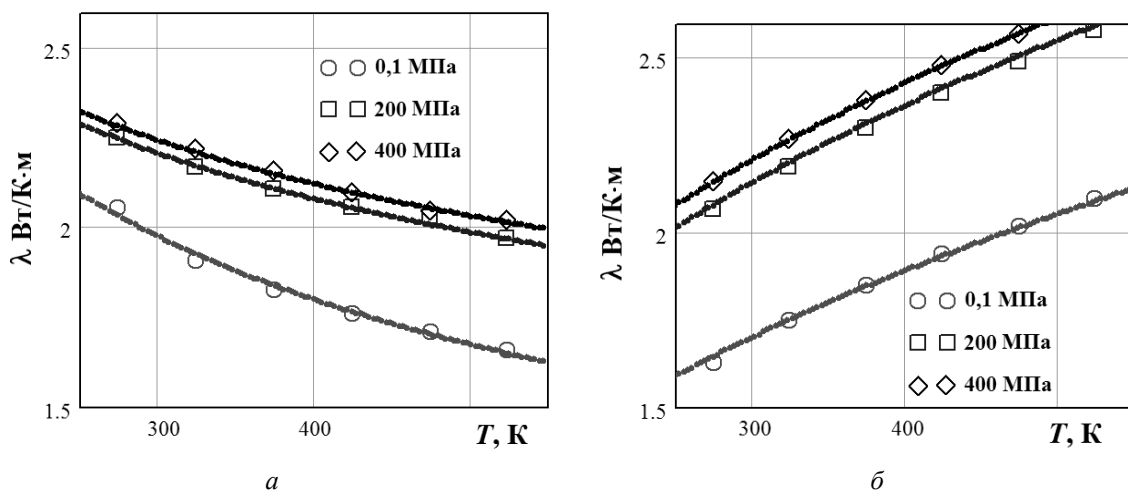


Рис.1. Зависимость теплопроводности песчаника (а) и мергеля (б) от температуры при различных давлениях. В обоих случаях вместе с экспериментальными точками приведены кривые, полученные в соответствии со степенным законом (2) и коэффициентами  $C$  и  $n$ , рассчитанными из экспериментальных данных по (5)

малом давлении ( $P = 0,1$  МПа) хорошо описывается уравнением (1) с показателями  $n_{\text{песчаника}} = -0,32$ ,  $n_{\text{мергеля}} = 0,37$  соответственно, и не описывается законом Эйкина.

Для количественного анализа наблюдаемого эффекта преобразуем уравнение (1), применив его как для переменной ( $T$ ), так и для фиксированной ( $T_0$ ) температуры:

$$\lambda(T, P) = C(T_0, P) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n(P)}, \quad (2)$$

где

$$C(T_0, P) = \lambda(T_0, P). \quad (3)$$

Следует отметить, что показатель  $n$  в степенном законе не зависит от выбора фиксированной температуры  $T_0$ , в то время как  $C$  зависит от этого выбо-

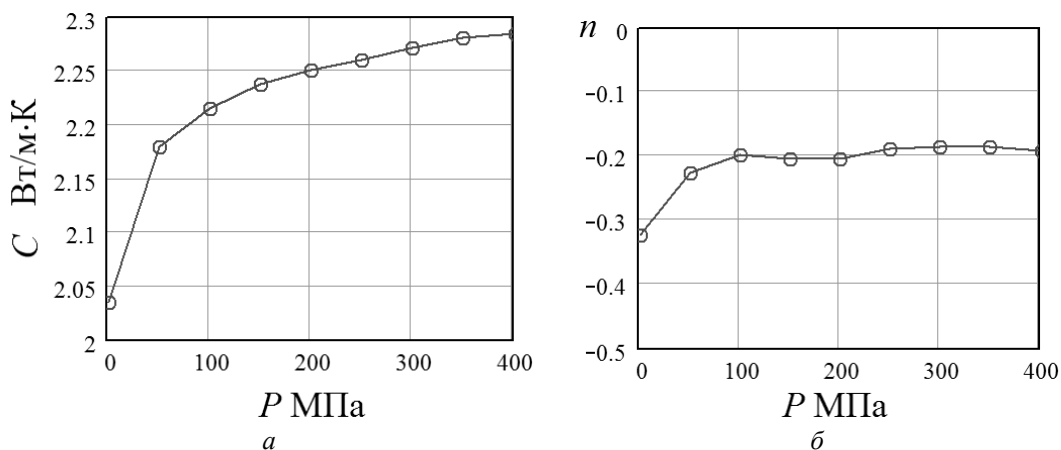


Рис.2. Барические зависимости коэффициентов для песчаника: (а)  $C$  ( $T_0 = 273$  К), (б)  $n$

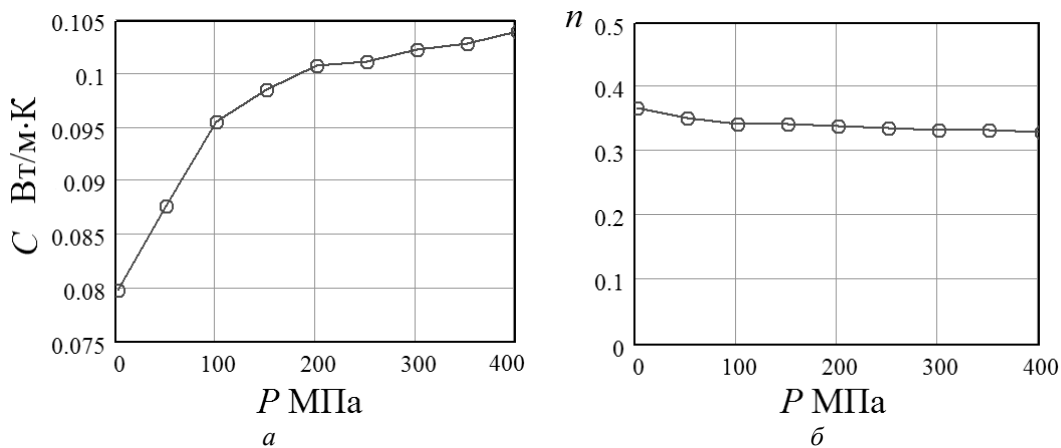


Рис.3. Барические зависимости коэффициентов для мергеля: (а)  $C$  ( $T_0 = 273$  К), (б)  $n$

ра. Кроме того, следует особо отметить, что при точном выполнении степенного закона (1) и достаточно низкой погрешности эксперимента, коэффициент  $C$  полностью определяется значением теплопроводности при температуре, выбранной в качестве фиксированной ( $T_0$ ).

Полагая, что нам известен набор дискретных значений  $\lambda_{i,j} = \lambda(T_i, P_j)$ , зафиксированных с определенной погрешностью, зависящие от давления коэффициенты  $C_j$  и  $n_j$  могут быть найдены следующим образом. Обозначим через

$$r_i = \frac{\ln(\lambda_i / \lambda_{i-1})}{\ln(T_i / T_{i-1})}, \quad g_i = \frac{\lambda_i / \lambda_0}{(T_i / T_0)^{n_j}}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

где  $r_i$  и  $g_i$  — безразмерные величины. Тогда имеем:

$$n_j = \frac{1}{N} \sum_i r_i, \quad C_j = \frac{1}{N} \sum_i g_i, \quad (5)$$

где  $N$  — объем выборки.

Результаты вычисления барических зависимостей  $C$  (в единицах теплопроводности) и  $n$  по формулам (4)-(5) для рассмотренных выше экспериментальных зависимостей  $\lambda(T, P)$  песчаника и мергеля представлены на рис.2 и 3 соответственно. Как видно из рисунков, давление в обоих случаях приводит к нелинейному росту теплопроводности горной породы. При этом наиболее интенсивный рост происходит в области до 100 МПа, а далее рост теплопроводности ослабевает.

Следует особо отметить, что давление влияет на температурную зависимость теплопроводности песчаника. Как мы видим из рис.2(б), если при  $P = 0,1$  МПа  $n \approx -0,28$ , то начиная с  $P = 100$  МПа значение  $n$  выходит на плато, и до  $P = 400$  МПа составляет  $n \approx -0,195 \pm 0,01$ .

Данное поведение хорошо согласуется с экспериментальными данными по влиянию давления на тепловые свойства [4-16], и скорость упругих волн [10,17] и может быть объяснено тем, что на начальном участке исследуемого диапазона давлений происходит интенсивный рост до давлений  $P \approx 100$  МПа, которое в геофизической литературе чаще всего объясняется захлопыванием микропор.

### Заключение

Таким образом, абсолютным стационарным методом измерена зависимость теплопроводности песчаника и мергеля от гидростатического давления до 400 МПа в области температур 273-523 К. Результаты показали, что температурная зависимость теплопроводности на всем барическом диапазоне следует степенному закону  $\lambda \sim T^n$ . Барическая зависимость проявляет резкий нелинейный рост до 100 МПа, сопровождающийся существенным изменением значения степенного показателя.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-08-00067а.

1. Eucken A. Über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fester Nichtmetalle // Annalen der Physik. 1911. Vol.339. №2. P.185-221.
2. Eucken A. Forsch. Gehiete Ingenieurue B3, Forschung, 1932. Vol.353. P.16-28.
3. Debye P. Zur Theorie der spezifischen Wärmen // Ann. Phys. 1912. Vol.344. №14. P.789-839.
4. Aurangzeb, Khan L.A., Maqsood A. Prediction of effective thermal conductivity of porous consolidated media as a function of temperature: a test example of limestones // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol.40. №16. P.4953-4958.
5. Horai K., Susaki G. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. Vol.55. P.292-305.
6. Clark S.P. Handbook of Physical Constant. N.Y.: Geological Society of America, 1966. 587 p.
7. Emirov S.N. Thermal conductivity of certain rocks under high pressures and temperatures // Pressure Investigations in Geosciences. Berlin: Akadem.-Verlag, 1989. P.123-126.
8. Emirov S.N., Gadzhiev G.G., Ramazanov E.N. et al. Study of the thermal conductivity of SiC-BeO ceramics at high pressures and temperatures // Izv. RAN. Ser.: Fizika. 2007. Vol.71. P.290-292.
9. Seipold U., Engler R. Investigation of the thermal conductivity of Jointed Granodiorites under Uniaxial Load and Hydrostatic Pressure // Gerland. Beitz. Geophysik. 1981. Vol.90. P.65-71.
10. Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я. и др. Петрофизические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
11. Hofmaister A.M. Thermal diffusivity of garnets at high temperature // Phys. Chem. Miner. 2006. Vol.33. P.45-62.
12. Abdulagatova Z.Z., Abdulagatov I.M., Emirov S.N. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone // Inter. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2009. Vol.46. P.1055-1071.
13. Эмиров С.Н., Рамазанова А.Э. Экспериментальные исследования процессов теплопереноса на границах зерен в упорядоченных и неупорядоченных средах // Изв. РАН. Сер.: Физика. 2013. Т.77. №3. С.317-321.
14. Hughes D.S., Savin F. Thermal Conductivity of Dielectric Solids at High Pressure // Phys. Rev. 1967. Vol.61. №3. P.861-863.
15. Horai K., Susaki J. The effect of Pressure on the Thermal Conductivity of Silicate rocks up to 12 kBar // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. Vol.55. P.292-305.
16. Abdulagatov I.M., Emirov S.N., Gairbekov Kh. A. Effect temperature and pressure on thermal conductivity of sandstone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009. Vol.46. №6. P.1055-1071.
17. Воларович М.М., Баюк Е.И., Левикин А.И., Томешевская И.С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях. М.: Наука, 1974. 223 с.

### References

1. Eucken A. Über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fester Nichtmetalle. Annalen der Physik, 1911, vol. 339, no. 2, pp.185-221.
2. Eucken A. Forsch. Gehiete Ingenieurue B3. Forschung, 1932, vol. 353, pp. 16-28.
3. Debye P. Zur Theorie der spezifischen Wärmen. Annalen der Physik, 1912, vol. 344, no. 14, pp. 789-839.
4. Aurangzeb A., Khan L.A., Maqsood A. Prediction of effective thermal conductivity of porous consolidated media as a function of temperature: a test example of limestones. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, vol. 40, no. 16, pp. 4953-4958.
5. Horai K., Susaki G. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kBar. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989, vol. 55, pp. 292-305.
6. Clark S.P. Handbook of Physical Constant. New York, Geological Society of America, 1966. 587 p.
7. Emirov S.N. Thermal conductivity of certain rocks under high pressures and temperatures. Pressure Investigations in Geosciences, Akademie-Verlag, Berlin, 1989, pp. 123-126.

8. Emirov S.N., Gadzhiev G.G., Ramazanova E.N., Abdulagatova Z.Z., Magomedmirzoev E.M. Study of the thermal conductivity of SiC–BeO ceramics at high pressures and temperatures. *Izvestiia RAN, seriia fizicheskaiia – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2007, vol. 71, no. 2, pp. 282-284.
9. Seipold U., Engler R. Investigation of the thermal conductivity of jointed granodiorites under uniaxial load and hydrostatic pressure. *Gerland. Beitz. Geophysik*, 1981, v.90, p.65-71.
10. Lebedev T. S., Korchin V.A., Savenko B.Ia., Shapoval V.I., Shepel' S.I., Burtnyi P.A. Petrofizicheskie svoistva mineral'nogo veshchestva v termobaricheskikh usloviakh litosfery [Petrophysical properties of mineral substances in thermobaric conditions of the lithosphere]. Kiev, "Naukova dumka" Publ., 1988. 248 p.
11. Hofmaister A.M. Thermal diffusivity of garnets at high temperature. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2006, vol. 33, pp. 45-62.
12. Abdulagatova Z.Z., Abdulagatov I.M., Emirov S.N. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, vol. 46, pp. 1055-1071.
13. Emirov S.N., Ramazanova A.E. Eksperimental'nye issledovaniia protsessov teploperenosa na granitsakh zeren v uporiadochennykh i neuporiadochennykh sredakh [Experimental study of heat transfer on the borders of grains in ordered and disordered media]. *Izvestiia RAN, seriia fizicheskaiia – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2013, vol. 77, no. 3, pp. 284-287.
14. Hughes D.S., Savin F. Thermal conductivity of dielectric solids at high pressure. *Physical Review*, 1967, vol. 61, no. 3, pp. 861-863.
15. Horai K., Susaki J. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kBar. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, vol. 55, pp. 292-305.
16. Abdulagatov I.M., Emirov S.N., Gairbekov Kh. A. Effect temperature and pressure on thermal conductivity of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 1055-1071.
17. Volarovich M.M., Baiuk E.I., Levikin A.I., Tomeshevskaiia I.S. Fiziko-mekhanicheskie svoistva gornykh porod i mineralov pri vysokikh davleniakh [Physical and mechanical properties of rocks and minerals under high pressure]. Moscow, "Nauka" Publ., 1974. 223 p.