
УДК 622.02 (075.8)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОВЫХ
(ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ) СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ
ТЕМПЕРАТУРЫ**

Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т., Турдубаева Ч.Б.
КГТУ им. И. Раззакова

Приведены результаты определения тепловых параметров горных пород после воздействия на них СВЧ волн при разных времени облучения. Определены теплоемкость, температуропроводность и удельное энергоемкость и удельное тепловое сопротивление горных пород, при разных времени воздействия СВЧ-волн. В качестве объектов изучения были взяты горные породы с разными физико-механическими свойствами: мрамор и песчаник с месторождения Кумтор. Были исследованы характер изменений тепловых свойств горных пород, наблюдаемых при повышении температуры нагрева с 300 до 1460 К. Для этого были проведены серии экспериментов из 14 образцов мрамора и песчаника при постепенном повышении времени воздействия СВЧ волн от 1 мин. до 12 минут. Зависимость тепловых характеристик исследуемых образцов от температуры определены с учетом следующих данных, для мрамора плотность - $\rho=2700$ кг/м³, а для песчаника месторождения Кумтор: $\rho=3000$ кг/м³ [2]. По формуле (2.1.1) и (2.1.2) были определены коэффициент теплопроводности и тепловое сопротивление исследуемых горных пород, при разных времени воздействия СВЧ-волн.

Ключевые слова: теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость, горные породы, СВЧ-облучение, температура.

**ТОО ТЕКТЕРДИН ЖЫЛУУЛУК (ТЕРМОФИЗИКАЛЫК)
КАСИЕТТЕРИНИН ТЕМПЕРАТУРАДАН БОЛГОН КӨЗ
КАРАНДЫЛЫГЫН ИЗИЛДӨӨ**

Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т., Турдубаева Ч.Б.
И. Раззаков ат. КМТУ

Ар түрдүү нурлануу убакыттарында ӨЖЖ толкундардын таасиринен кийин тоо тектердин жылуулук параметрлерин аныктоонун

натыйжалары келтирилген. ӨЖЖ толкундардын таасиринин астында ар кандай мезгилдеринде жылуулук сыйымдуулугу, жылуулук диффузивдүүлүгү, салыштырма энергия сыйымдуулугу жана тоо тектердин салыштырма жылуулук каршылыгы аныкталган. Изилдөө объектилери катары ар кандай физикалык-механикалык касиеттерге ээ тоо тектери алынган: Кумтөр кенинен алынган кумдук жана мрамор. Жылытуу температурасы 300дөн 1460 К чейин жогорулаганда байкалган тоо тектердин жылуулук касиеттеринин өзгөрүшүнүн мүнөздөмөлөрү изилденген. Бул үчүн мрамор менен кумдуктун 14 үлгүсүн колдонуу менен, ӨЖЖ микротолкундардын убактысын 1 мүн. 12 мүнөткө чейин акырындык менен жогорулатып бир катар эксперименттер жүргүзүлгөн. Изилденген үлгүлөрдүн жылуулук мүнөздөмөлөрүнүн температурадан көз карандылыгы төмөнкү маалыматтарды эске алуу менен аныкталган, мрамор үчүн тыгыздык $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$, Кумтөр кенинин кумдуктары үчүн: $\rho=3000 \text{ кг/м}^3$ жана атайын формулаларды колдонуу менен ӨЖЖ микротолкундардын таасири ар кандай мезгилдеринде изилденген тоо тектердин жылуулук өткөрүмдүүлүк коэффициенти жана салыштырма жылуулук каршылыгы аныкталган.

Баштапкы сөздөр: жылуулук өткөрүмдүүлүк, жылуулук диффузия, салыштырма жылуулук сыйымдуулук, салыштырма каршылык, тоо тектери, микротолкундуу нурлануу, температура.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THERMAL (THERMOPHYSICAL) PROPERTIES OF ROCKS ON TEMPERATURE

Sultanalieva R.M., Konushbaeva A.T., Turdubaeva Ch.B.

Kyrgyz State Technical University n.a I. Razzakov

The results of determining the thermal parameters of rocks after exposure to microwave waves at different irradiation times are presented. The heat capacity, thermal diffusivity, specific energy capacity and specific thermal resistance of rocks were determined at different times of exposure to microwave waves. Rocks with different physical and mechanical properties were taken as objects of study: marble and sandstone from the Kumtor deposit. The nature of changes in the thermal properties of rocks observed when the heating temperature increased from 300 to 1460 K was investigated. For this, a series of experiments were carried out using 14 samples of marble and sandstone with a gradual increase in the exposure time to microwave waves from 1 min. up to 12 minutes. The dependence of the thermal characteristics of the studied samples on temperature was determined taking into account the following data, for marble the density is $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$, and

for sandstone of the Kumtor deposit: $\rho=3000 \text{ kg/m}^3$ [2]. Using formulas (2.1.1) and (2.1.2), the thermal conductivity coefficient and thermal resistance of the studied rocks were determined at different times of exposure to microwave waves.

Key words: thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat capacity, rocks, microwave irradiation, temperature.

Данные о тепловых характеристиках пород используются для изучения естественных тепловых полей в недрах, корреляции разрезов скважин, их литологического расчленения, выделения в них газоносных горизонтов, исследования процессов теплообмена при использовании глубинного тепла Земли и решения других задач.

Исследование тепловых свойств горных пород лежит в основе применения методов геотермии при поисках, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

Проблема определения тепловых свойств горных пород связана с фундаментальной проблемой оценки теплового потока, что напрямую ведет к изучению глубинного строения как отдельных регионов, так и в целом Земной коры. В то же время следует отметить недостаточную изученность влияния высоких температур на тепловые свойства горных пород, что не позволяет проводить достоверные определения величин глубинных тепловых потоков и затрудняет применение геотермических исследований при решении различных фундаментальных и прикладных задач.

Горные породы являются сравнительно плохими проводниками тепла. Тепловые свойства характеризуются теплопроводностью, теплоёмкостью, температурапроводностью и удельной тепловой сопротивлению. Параметры тепловых свойств связаны между собой таким образом:

$$\lambda = \alpha \cdot c \cdot \rho, \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м²·°С; α - коэффициент температуропроводности, м²/ч; c – удельная теплоемкость, кДж/кг·°С; ρ - плотность, кг/м³.

Теплопроводность характеризует способность горных пород проводить тепло. Удельная теплоемкость – это количество тепла, необходимое для нагрева 1 кг породы на 1 °К. Коэффициент температуропроводности служит для определения скорости изменения температуры единицы объема породы, т.е изменение ее температуры за единицу времени.

Теплопроводность зависит от: способности минералов; влажности; размеров зерен и плотности пород.

Теплопроводность пористых пород зависит от типа пластовых флюидов и их состояния. Коэффициент теплопроводности воды (0,5 ккал/м·ч·°С) в 4 раза больше, чем нефти, в 14 раз больше газа, в 25 раз больше воздуха [1].

При увеличении температуры на 10 °С коэффициент теплопроводности уменьшается на 1-2 %. Увеличение давления почти не влияет на теплопроводность и другие тепловые свойства пород.

Из породообразующих минералов осадочных горных пород большими значениями теплопроводности обладает кварц (6-10 ккал/м·ч·°С). Здесь уместно также отметить большую теплопроводность алмазов (100-150 ккал/м·ч·°С), которые используются при изготовлении алмазных долот.

Удельное тепловое сопротивление ε , (м · °С)/Вт, — это величина, обратная теплопроводности:

$$\varepsilon = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

Удельное тепловое сопротивление изменяется в зависимости от следующих факторов: плотности пород, влажности пород, фильтрационных свойств пород; природы жидкости, содержащейся в

порах горных пород (тепловое сопротивление водоносных горизонтов примерно в четыре с лишним раза превышает сопротивление нефтеносных горизонтов); температуры горных пород — с увеличением температуры тепловое сопротивление пород возрастает, причем до 100 °С оно изменяется незначительно, особенно для влажных пород, так как тепловое сопротивление воды при увеличении температуры уменьшается.

Температуропроводность горных пород характеризует теплоизоляционные свойства их. При увеличении плотности пород температуропроводность уменьшается, но незначительно. При увлажнении температуропроводность растет. Повышение температуры уменьшает температуропроводность большинства горных пород за исключением глин, углей, для которых она увеличивается.

Теплоемкость горных пород изменяется незначительно – от 0,10 до 0,5 ккал/кг·°С. Для большинства горных пород этот диапазон еще меньше (0,15-0,24 ккал/кг·°С). Теплоемкость породы зависит от ее минерального состава, но не зависит от зернистости, слоистости. С повышением температуры теплоемкость увеличивается.

Увеличение пористости ведет к уменьшению теплоемкости. Теплоемкость воды (1 ккал/г·°С) во много раз превышает теплоемкость любого минерала, поэтому пористые увлажненные породы имеют наибольшую теплоемкость. Замерзание влажной горной породы приводит к небольшому снижению ее теплоемкости. В целом же теплоемкость мерзлой пористой породы выше теплоемкости плотной породы.

Экспериментально установлено, что тепловые характеристики влияют на прочностные свойства всех горных пород и при нагреве в исследованных пределах возрастают.

При нагреве до 200-250 °С уменьшается расстояние между зернами, уменьшается пористость и увеличивается сила сцепления

между зернами. Возникающие в породах внутренние термические напряжения еще не достаточны для образования значительного числа микротрещин. Для каждой горной породы существует критическая температура, при нагревании до которой прочность увеличивается.

Дальнейшее повышение температуры выше 250-800 °С вызывает у большинства горных пород уменьшение их прочности. При этом быстро возрастают термические напряжения, а объемное расширение кристаллов уменьшает пористость и трещиноватость породы, после чего образуются микротрещины.

Например, микроскопические исследования образцов гранита показали, что при увеличении температуры нагрева с 300 °С до 600 °С приводит к увеличению числа микротрещин в 4-5 раз. При нагреве таких пород, как кварцат, гранит, песчаник до 400-600 °С твердость и предел текучести увеличиваются на 30 %.

Были исследованы характер изменений тепловых свойств горных пород, наблюдаемых при повышении температуры нагрева с 300 до 1460 К. Для этого были проведены серии экспериментов из 14 образцов мрамора и песчаника при постепенном повышении времени воздействия СВЧ волн от 1 мин. до 12 минут. Зависимость тепловых характеристик исследуемых образцов от температуры определены с учетом следующих данных, для мрамора плотность - $\rho=2700$ кг/м³, а для песчаника месторождения Кумтор: $\rho=3000$ кг/м³ [2]. По формуле (1) и (2) были определены коэффициент теплопроводности и тепловое сопротивление исследуемых горных пород, при разных времени воздействия СВЧ-волн.

Ниже, в таблицах приводятся результаты определения тепловых параметров горных пород после воздействия на них СВЧ волн при разных времени облучения.

Таблица 1. Результаты тепловых характеристик для мрамора

t , мин. время облучен ия	c , кДж/кг·К удельная тепло- емкость	T , К Темпера- тура нагрева	a , м ² /с темпера- турапро- водн ость	λ , Вт/м·К теплопро- водность	ε , м·К/Вт тепловое сопротив- ление
1	0,81	401	0,000732	1,77876	0,562189
2	0,975	656	0,000608	1,7784	0,562303
3	1,14	839	0,00052	1,7784	0,562303
5	1,462	1086	0,000405	1,77633	0,562958
7	1,788	1240	0,000331	1,775484	0,563227
9	2,11	1347	0,000281	1,77873	0,562199
12	2,6	1456	0,000228	1,7784	0,562303

Таблица 2. Результаты тепловых характеристик для песчаника

t , мин. время облучения	C , кДж/кг·К удельная тепло- емкость	T , К Темпера- тура нагрева	a , м ² /с темпера- тура- проводность	λ , Вт/м·К теплопро- водность	ε , м·К/Вт тепловое сопротив- ление
1	0,99	304	0,000976	2,608848	0,383311
2	1,18	495	0,000819	2,609334	0,38324
3	1,38	629	0,0007	2,6082	0,383406
5	1,78	806	0,000543	2,609658	0,383192
7	1,97	871	0,000491	2,611629	0,382903
9	2,17	922	0,000445	2,607255	0,383545
12	2,57	999	0,000376	2,609064	0,383279

По этим данным построены графики зависимости коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления от температуры нагрева для исследуемых горных пород.

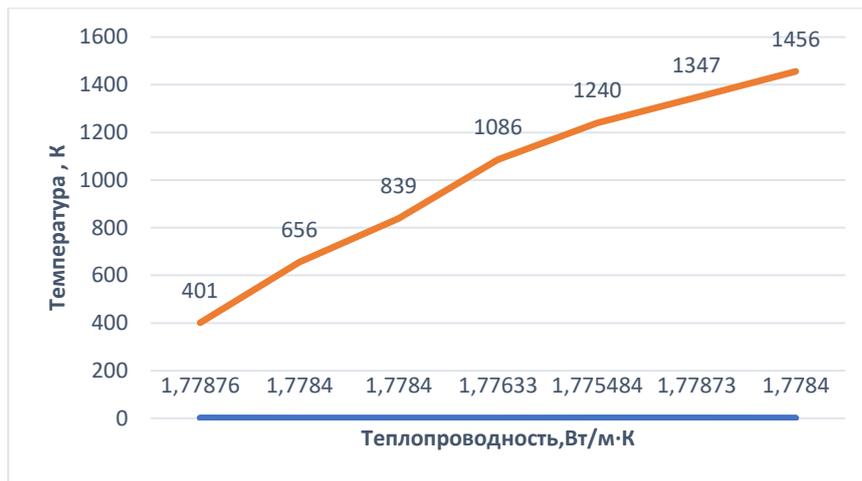


Рис. 1. Зависимость теплопроводности мрамора от температуры нагрева

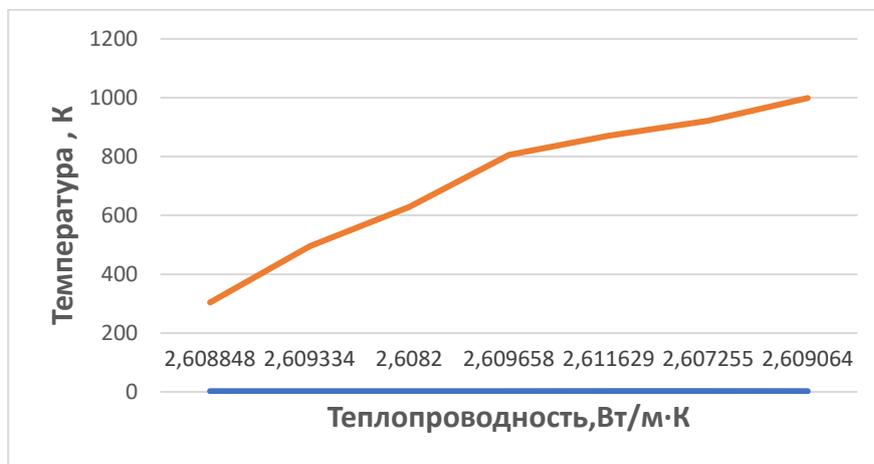


Рис. 2. Зависимость теплопроводности песчаника от температуры нагрева

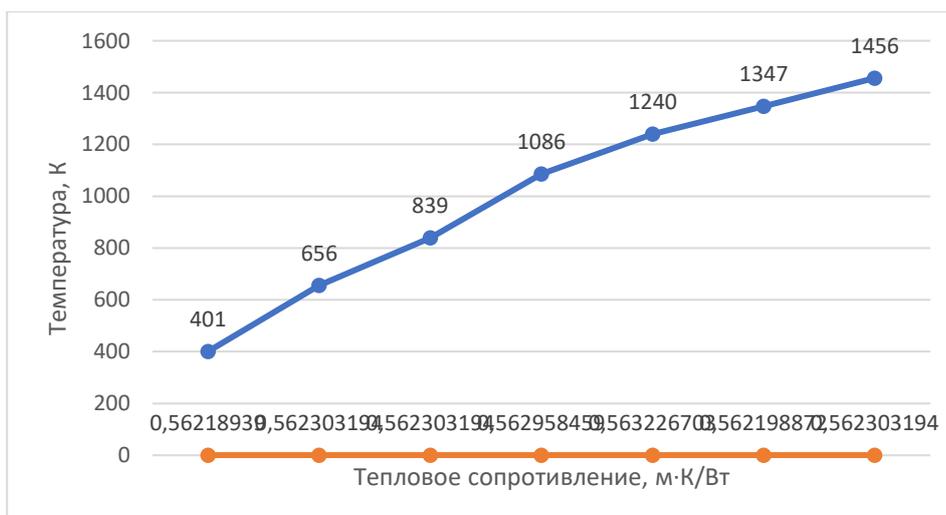


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивление мрамора от температуры нагрева

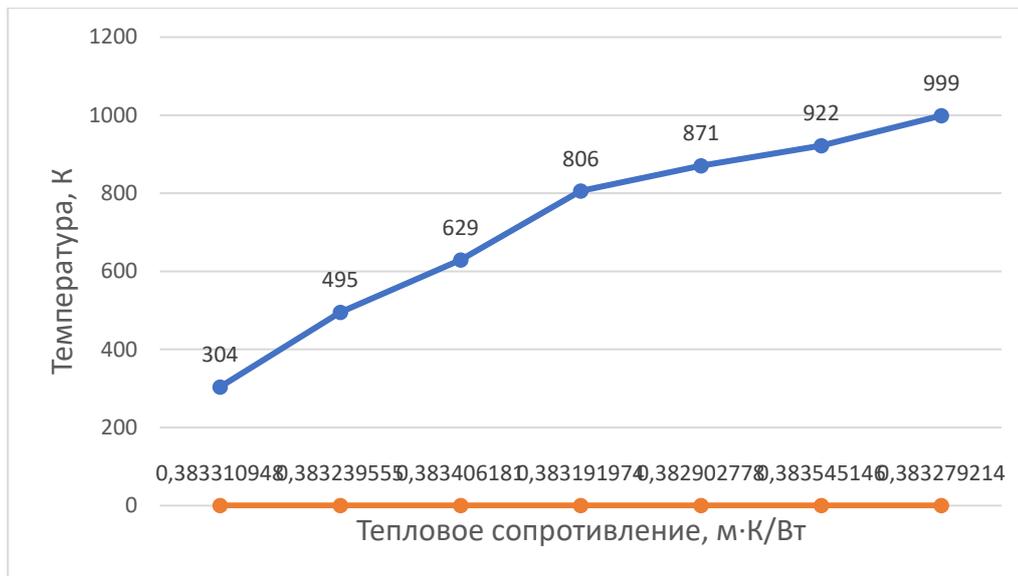


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивление песчаника от температуры нагрева

Из таблиц и рисунков видно, что воздействие СВЧ волн на горные породы приводит к не однозначному изменению их тепловых параметров от времени облучения. Для исследуемых горных пород, теплопроводность увеличивается при увеличении температуры нагрева пород.

Практическая ценность выполненных исследований в следующем:
 - результаты исследований тепловых свойств горных пород в зависимости от температуры могут применяться для решения задач горного производства.

Выводы

1. Выявлено, что воздействие СВЧ волн на горные породы приводит к не однозначному изменению их тепловых параметров от времени облучения. Для исследуемых горных пород, теплопроводность увеличивается при увеличении температуры нагрева пород.

2. Приведены результаты исследований тепловых свойств горных пород в зависимости от температуры могут применяться для решения задач горного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев Л.П., Кузьев Л.С., Ямщиков В.С. Физические свойства горных пород при высоких температурах. М.: Недра 1969 г.
2. Явтушенко О.В., Коробской О.В. Исследование воздействия СВЧ-энергии на некоторые горные породы //Сб. "Механика и разрушение горных пород", ч. 4. Киев, 1976.- с. 142 – 144.
3. Под. ред. Протодяконова М.М. Свойства горных пород и методы их определения. М.: Недра 1969 г.
4. Султаналиева Р.М. Принципы целенаправленного изменения механических свойств руд и минералов // Монография -Бишкек, 2014, 153 с.
5. Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З. Определение свойств горных пород. - М.: Госгортехиздат, 1992.-331 с.
6. Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. Определение температуры разупрочнения крепких руд от времени воздействия СВЧ волн // Материалы международной научно-практической конфер. «Новая наука: теоретический и практический взгляд»- Нижний Новгород, 2016, -с. 21-25.
7. Горная энциклопедия. Издательство «МИФ», 2010. 350 с.