

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 536.21, 691.214.8, 552.543

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11816>

Исследование теплопроводности природных карбонатов

П. А. Попов¹, А. А. Зенцова¹, В. В. Воронов², И. А. Новиков², Е. В. Чернова², П. П. Федоров²✉

¹ ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского», ул. Бежицкая, 14, 241036 Брянск, Российская Федерация

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Российская Федерация

Аннотация

Абсолютным стационарным методом продольного теплового потока в интервале температур 50–300 К и динамическим методом в интервале 323–573 К измерена теплопроводность природных монолитов кальцитовых, доломитовых мраморов и известняков из различных месторождений. В большинстве своем кальцитовые мраморы по теплопроводности уступают доломитовым. При комнатной температуре значения коэффициента теплопроводности всех исследованных образцов ниже $k = 5$ Вт/(м·К).

Проведено сравнение полученных данных с литературными. Разнообразие экспериментальных данных разных авторов по теплопроводности карбонатов связано с качественными различиями исследованных образцов.

Ключевые слова: минералы, мрамор, кальцит, доломит, известняк, сидерит, теплопроводность, фонон-дефектное рассеяние, температурная зависимость

Источник финансирования: Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП Брянского госуниверситета и ЦКП ИОФ РАН.

Благодарности: Авторы благодарят В. А. Маслова и Ю. В. Яшунского за предоставление образцов № 6 и № 7 соответственно.

Для цитирования: Попов П. А., Зенцова А. А., Воронов В. В., Новиков И. А., Чернова Е. В., Федоров П. П. Исследование теплопроводности природных карбонатов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 127–134. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11816>

For citation: Popov P. A., Zentsova A. A., Voronov V. V., Novikov I. A., Chernova E. V., Fedorov P. P. Study of the thermal conductivity of natural carbonates. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 127–134. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11816>

✉ Федоров Павел Павлович, e-mail: ppfedorov@yandex.ru

© Попов П. А., Зенцова А. А., Воронов В. В., Новиков И. А., Чернова Е. В., Федоров П. П., 2024



1. Введение

Карбонат кальция CaCO_3 и карбонат кальция-магния $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломит) являются основой многих известняковых горных пород. Карбонат кальция в основном представлен такими кристаллическими структурами, как кальцит (пр. гр. *R3c*) и арагонит (пр. гр. *Pmcn*), реже встречается растворимый в воде ватерит (пр. гр. *P63/mmc*). Среди природных карбонатов обычны также изоструктурные кальциту магнезит MgCO_3 и сидерит FeCO_3 . Мрамор представляет собой перекристаллизованный при повышенной температуре и давлении (метаморфизированный) известняк, состоящий в основном из кальцита. Основой доломитового мрамора является карбонат кальция-магния (пр. гр. *R3*).

Сфера применения мраморов чрезвычайно широка. Использование их как строительного, отделочного и облицовочного материала для ванных комнат, бассейнов, каминов и пр. предполагает наличие определенного теплового потока и соответствующего перепада температуры. Величина последнего связана с такой теплофизической характеристикой материала, как коэффициент теплопроводности. Знание величин теплопроводности горных пород необходимо для построения геофизических моделей. Теплопроводность, связанная со скоростью распространения звуковых волн, для поликристаллических материалов зависит от пористости и строения межзеренных границ и, таким образом, позволяет оценивать механические характеристики горных пород.

Объективная сложность процессов теплопереноса не позволяет дать достаточно точную априорную оценку этой характеристики, поэтому приоритет принадлежит экспериментальным методам ее определения. Исследованию теплопроводности природных карбонатов посвящены работы [1–16]. Теоретические расчеты приведены в [17]. Однако в найденных нами публикациях приводятся значения коэффициента теплопроводности при комнатной температуре или рассматривается поведение теплопроводности как горных пород, так и кристаллических кальцита и доломита, при повышенных температурах. Хотя и низкотемпературная область представляет практический и научный интерес, например, для геофизических расчетов в условиях Арктики. При этом экспериментальные данные разных авторов по теплопроводности мраморов и других известняковых пород существенно разнятся, что, очевидно, в основном свя-

зано с качественным разнообразием исследуемых образцов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование теплопроводности образцов природных карбонатов в широком интервале температур – от субазотных до повышенных. Данная работа продолжает наши измерения теплопроводности природных минералов и горных пород [18–21].

2. Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были использованы природные образцы, перечисленные в табл. 1 и показанные на рис. 1. Были исследованы четыре метаморфизированных образца (мраморы № 1–4) и четыре образца осадочных пород (№ 5–8).

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре Bruker D8 Advance ($\text{CuK}\alpha$ -излучение). Для расчета параметров решетки использовали программное обеспечение TOPAS. Микроструктура образцов оценивалась посредством оптической микроскопии (микроскоп $\mu\text{Vizor 103}$) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), (микроскоп EVO 10 Zeiss, Germany с LaB_6 катодом). Полуколичественный химический микроанализ (СЭМ-ЭДС) выполнен с использованием спектрометра Smart EDX (METEK-Zeiss, USA & Germany).

Образцы для измерений теплопроводности были вырезаны из однородных областей монолитов. Для температурного интервала 50–300 К использовались образцы в виде параллелепипедов с размерами, указанными в табл. 2. Для исследований при повышенных температурах были изготовлены образцы в виде таблеток диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. Следует иметь в виду, что указанные размеры предполагают усреднение результатов измерений по довольно большому объему образцов. Это отличает нашу методику от, например, примененной Мерриманом и др. [14] при исследовании образцов с размерами ~1 мм.

Теплопроводность в интервале температур 50–300 К измерялась абсолютным стационарным методом продольного теплового потока. Экспериментальная аппаратура и методика измерений описаны в [23]. Для обеспечения плоского теплового фронта резистивный нагреватель, задающий измеряемый перепад температуры вдоль образца, был проклеен на его торцевой поверхности. Погрешность определения величины теплопроводности была не хуже $\pm 5\%$.



Рис. 1. Фотографии исследованных образцов: а – № 1; б – № 2 (мрамор); с – № 3; д – № 4; е – № 5; ф – № 6; г – № 7; h – № 8

Таблица 1. Характеристики исследованных образцов

№	Наименование, местонахождение	Фазовый и химический состав	Параметры решетки		Средний размер зерна, мкм
			a, Å	c, Å	
1	Мрамор доломитовый, г. Улан-Уде	Доломит, CaMg(CO ₃) ₂	4.8142±0.0001	16.033±0.004	250
2	Мрамор, Слюдянка, карьер Динамитный	Кальцит магниальный Ca _{0.934} Mg _{0.07} CO ₃ + доломит, CaMg(CO ₃) ₂	4.963±0.001	16.95±0.01	1000
			4.808±0.001	16.02±0.05	
3	Мрамор, Паланга	Кальцит, Ca _{0.96} Mg _{0.04} CO ₃	4.984±0.001	17.03±0.01	30
4	Мрамор, Греция, п-ов Кассандра	Кальцит, Ca _{0.96} Mg _{0.04} CO ₃	4.990±0.001	17.01±0.01	20
5	Известняк, г. Руза	Кальцит	4.984±0.001	17.03±0.01	
6	Известняк плотный, г. Таруса («Таруский мрамор»)	Кальцит, Ca _{0.96} Mg _{0.04} CO ₃	4.985±0.001	17.04±0.01	40
7	Доломит, река Вазуза	Доломит CaMg(CO ₃) ₂ + кварц SiO ₂	4.814±0.002	16.06±0.01	40
8	Сидерит, г. Руза [22]	Сидерит, FeCO ₃	4.705±0.003	15.45±0.01	5–10

Таблица 2. Геометрические размеры образцов в виде параллелепипедов мм³ и значения теплопроводности (Вт/(м×К)) исследованных образцов при различных температурах

T, K	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
50	15.2	10.5	9.4	8.23	8.67	4.76	2.30	1.17
100	9.37	7.83	6.72	5.84	5.38	4.42	3.33	1.47
150	7.06	6.14	5.15	4.61	4.15	3.88	3.49	1.67
200	5.89	5.14	4.22	3.91	3.48	3.40	3.39	1.80
250	5.21	4.52	3.62	3.51	3.07	3.04	3.25	1.87
300	4.72	4.06	3.24	3.22	2.76	2.79	3.08	1.90
350	4.3	3.7	3.0	3.0	2.5	2.6	–	1.9
400	4.0	3.4	2.7	2.8	2.4	2.4	–	2.0
450	3.7	3.2	2.6	2.6	2.3	2.2	–	2.0
500	3.5	3.1	2.5	2.4	2.2	2.1	–	2.0
550	3.3	3.0	2.4	2.3	2.1	2.1	–	2.0
573	3.3	2.9	2.4	2.3	2.1	2.1	–	2.0
Геометрические размеры образцов, вырезанных для измерений, мм ³								
	10.1×	12.4×	10.7×	9.6×	12.2×	11.1×	9.7×	11.5×
	9.4×	10.7×	9.6×	8.1×	13.7×	8.7×	9.7×	12.5×
	25	25	19	23	25	23	20	25

Для исследования теплопроводности в интервале 323–573 К использовался измеритель теплопроводности ИТЛ-400 с погрешностью измерений в пределах ± 10%.

3. Результаты и обсуждение

Исследованные образцы были однофазны, за исключением № 2 (двухфазная смесь магниального кальцита с доломитом) и № 7 (доломит с существенным содержанием неизоморфных примесей: около 3 % кварца, следы фосфа-

та кальция). Используя фазовую диаграмму системы CaCO₃-MgCO₃ [24] как геотермометр, можно констатировать, что в двухфазном образце № 2 содержание магния в твердом растворе Ca_{1-x}Mg_xCO₃ соответствует температуре метаморфизации около 600 °С.

Экстраполяция кривой предельной растворимости магния в твердом растворе Ca_{1-x}Mg_xCO₃, полученной Гольшмитом и Хёрдом [24], до комнатной температуры дает величину x ≤ 10⁻⁴. Повышенное содержание магния в однофазных

кальцитовых образцах (табл. 1), на несколько порядков превышающее равновесную растворимость магния в твердом растворе в системе $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ при низких температурах, вероятно, свидетельствует о биогенном происхождении этих известняков [25].

На рис. 2 представлены графики температурной зависимости теплопроводности $k(T)$ исследованных образцов. В численном виде результаты измерений $k(T)$ приведены в табл. 2.

Видно, что полученные данные весьма широко варьируются, особенно в области низких температур. Зависимость теплопроводности от температуры меняется от монотонно убывающей, характерной для монокристаллических образцов, до возрастающей, свойственной для сильно разупорядоченных материалов.

При комнатной и более высоких температурах теплопроводность всех исследованных образцов ниже 5 Вт/(м·К) , что условно позволяет отнести данные материалы к тепловым изоляторам. Невысокая твердость соединений (менее 4 по Моосу), характерная спайность монокристаллов и сравнительно низкие температуры плавления и разложения свидетельствуют о слабости межионных связей, негативно влияющей на эффективность процесса теплопереноса.

Выше всех на рис. 2 расположены точки $k(T)$ доломитового образца № 1 (кривая 1). Во всем исследованном температурном интервале они удовлетворительно (коэффициент корреляции $R = 0.9978$) аппроксимируются степенной функцией $k(T) = 190.8 \cdot T^{-n}$, где показатель степени $n = 0.651$ не намного ниже соответствующих значений, близких к $n = 1$, для многих диэлектрических монокристаллов с совершенной структурой [26–28]. При снижении температуры до минимальной $T = 50 \text{ К}$ не наблюдается ни увеличения темпов роста $k(T)$ с переходом в характерную для кристаллов экспоненциальную зависимость [29], ни, наоборот, замедления темпов роста $k(T)$ с проявлением выхода на максимум. По-видимому, этот характерный для кристаллических материалов максимум $k(T)$ имеет место при значительно более низких температурах. Для образцов мрамора № 4 и известняка № 5 подобная аппроксимирующая функция имеет вид $k(T) = 67.08 \cdot T^{-0.533}$ ($R = 0.9986$) и $k(T) = 97.333 \cdot T^{-0.623}$ ($R = 0.9967$) соответственно. Охват одной функцией столь широкого температурного интервала, по-видимому, можно объяснить доминированием процессов рассеяния фононов на межзеренных границах.

Графики $k(T)$ мраморов № 2, № 3 и, в большей мере, известняка № 6 (кривые 2, 3 и 6 соответственно) демонстрируют замедление темпов роста при снижении температуры до $T = 50 \text{ К}$. При невысокой абсолютной величине теплопроводности это является обычным обстоятельством для материалов с частичным разупорядочением структуры.

Включения кварца (образец № 7, кривая 7) в доломитовую матрицу приводят к резкому падению теплопроводности с размытым максимумом $k(T)$ при явном стремлении $k \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$. Очевидной причиной этого является значительное фонон-дефектное рассеяние.

Теплопроводность сидерита демонстрирует (кривая 8) максимальное разупорядочение структуры с достижением, по-видимому, средней длиной свободного пробега фононов минимального возможного значения, сравнимого с междоузельными расстояниями. Малые размеры кристаллических зерен предполагают проявление интенсивного фононного рассеяния вследствие частого пересечения тепловым потоком межзеренных границ. Заметим, что для исследованного в работе [22] образца уширение линий на рентгенограмме указывает на размер областей когерентного рассеяния $D = 26 \text{ нм}$.

На рис. 3 представлено сравнение полученных нами данных для образцов доломитового (№ 1) и кальцитового (№ 4) мраморов с литера-

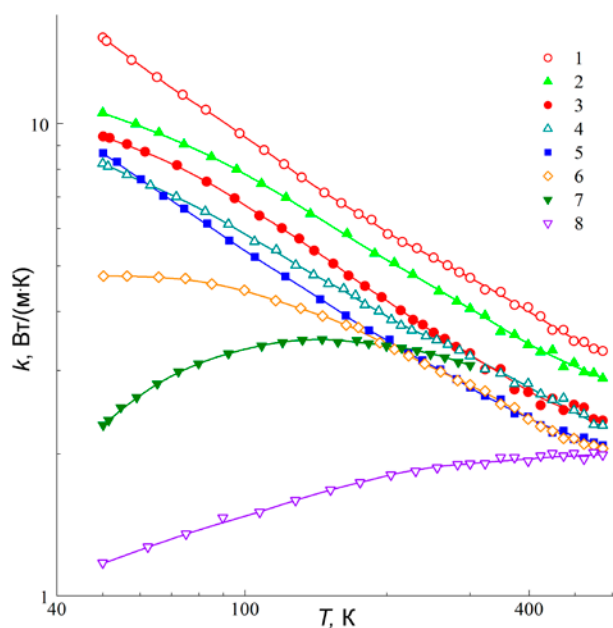


Рис. 2. Температурные зависимости теплопроводности образцов: № 1 (1); № 2 (2); № 3 (3); № 4 (4); № 5 (5); № 6 (6); № 7 (7); № 8 (8)

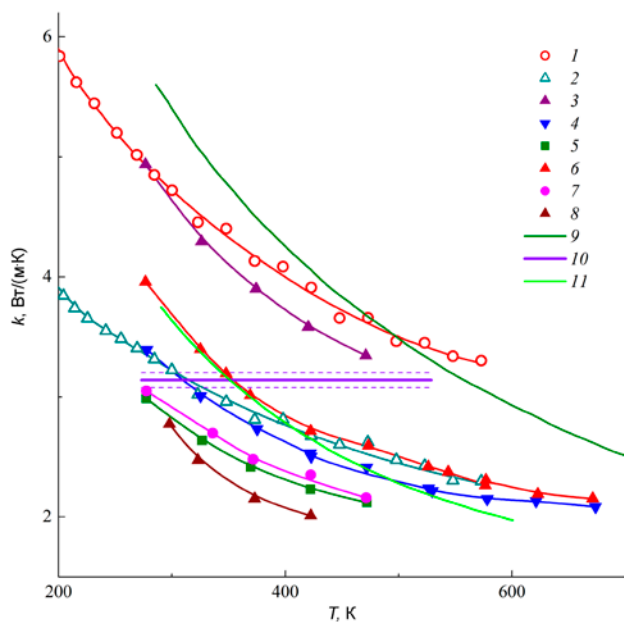


Рис. 3. Температурные зависимости теплопроводности: образец № 1 (1); образец № 4 (2); доломит [1] (3); монокристалл кальцита перпендикулярно оси с [1] (4); мрамор перпендикулярно пласти [1] (5); монокристалл кальцита вдоль оси с [1] (6); мрамор параллельно пласти [1] (7); мрамор [13] (8); доломит, усреднение для четырех образцов [14] (9); доломит [13] (10); кальцит [14] (11)

турными данными по результатам измерения теплопроводности родственных материалов.

Видно, что выявленная нами теплопроводность доломита близка к полученной Мерриманом и др. [14] (кривая 9), которые представили результат усреднения $k(T)$ для четырех образцов минерала со средним размером зерна 0.369 мм, скелетной плотностью 2.83 г/см³ и пористостью менее 1 % и содержащего в небольших количествах железо ($FeO = 0.18–0.42$ масс. %) и марганец ($MnO = 0.1$ масс. %). При этом общее содержание $CaO + MgO$ в этом минерале составляет 98.94–99.23 масс. % по сравнению с идеальным доломитом, а следовые примеси (< 0.1 масс. %) включают оксиды Al, Na и Ti [14]. Обращает на себя внимание крутизна зависимости $k(T)$ – при описании ее степенной функцией $k \sim T^{-n}$. Значение показателя степени в области высоких температур превосходит $n = 1$. Такая сильная зависимость не характерна для материалов в стабильном кристаллическом состоянии [29, 30]. Данные $k(T)$ Бирча и Кларка [1] для образца доломита (кривая 3) с плотностью 2.826 г/см³ и средним размером зерна 0.01 мм по абсолютной величине теплопроводности мало отличаются от наших.

При этом также можно отметить различную степень крутизны графиков 1 и 3.

Было зафиксировано [13] и практическое отсутствие зависимости теплопроводности от температуры (горизонтальная линия 10 на рис. 3) доломита с плотностью 2.70 г/см³ и открытой пористостью 1–2 %. Эмиров и др. объясняют такую особенность наличием в структуре материала аморфной составляющей.

Мраморы, исследованные Бирчем и Кларком [1] (кривые 5 и 7) и Гарсиа [11] (кривая 8), по теплопроводности значительно уступают исследованному нами образцу мрамора № 4 (кривая 2). Важно отметить, что полученный нами график $k(T)$ для образца № 4 при повышенных температурах занимает промежуточное положение между кривыми 4 и 6 для монокристаллического кальцита по данным [1].

Таким образом, в целом можно констатировать, что теплопроводность кристаллического доломита выше, чем кальцита. Структуры этих двух минералов сходны между собой, доломит отличается замещением половины катионов кальция катионами магния, которые образуют упорядоченные слои, расположенные перпендикулярно оси с (рис. 4). Обычно замещение части катионов с образованием твердого раствора при изовалентном изоморфизме приводит к понижению теплопроводности. Этот факт зафиксирован на многочисленных примерах для соединений со структурой флюорита [31]. Однако пара кальцит – доломит выпадает из этой закономерности. Повышенная теплопроводность доломита может быть связана с более резким повышением механических характеристик по отношению к росту плотности при переходе от кальцита к доломиту.

4. Заключение

Таким образом, получены экспериментальные данные по теплопроводности доломитового, кальцитового мраморов и известняков в широкой температурной области – от субатомных температур до повышенных. В большинстве случаев величина теплопроводности убывает в указанном ряду материалов. Выявленные широкие вариации характера температурной зависимости теплопроводности связаны со значительными различиями в степени разупорядоченности исследованных объектов.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

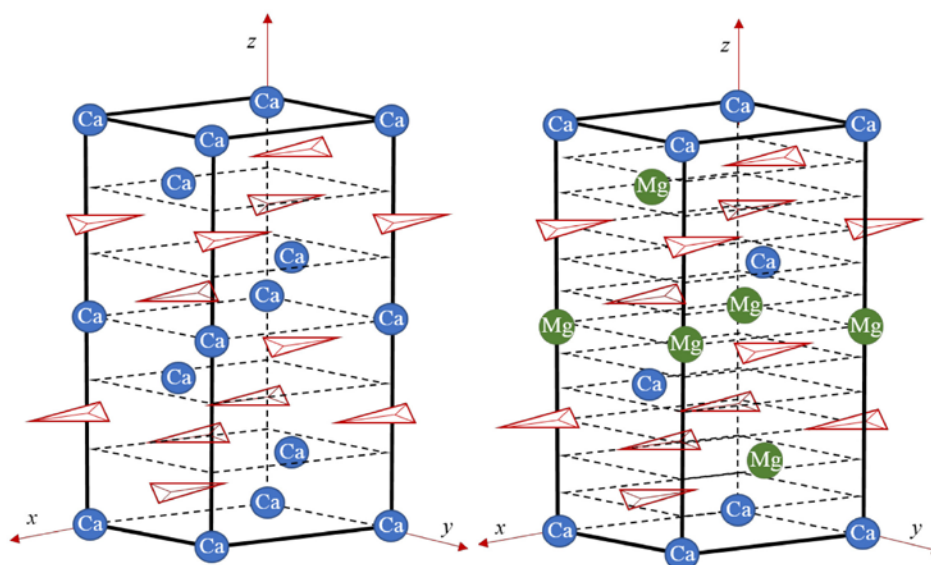


Рис. 4. Кристаллическая структура кальцита (а) и доломита (б): Красные треугольники – группы CO_3 [17]

Конфликт интересов

Авторы не имеют явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Список литературы

- Birch F., Clark H. The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. *American Journal of Science*. 1940;238(8): 529–558. <https://doi.org/10.2475/ajs.238.8.529>
- Clark H. The effects of simple compression and wetting on the thermal conductivity of rocks. *American Geophysical Union Transactions*. 1941;22: 543–544. <https://doi.org/10.1029/TR022i002p00543>
- Zierfuss H., Vliet van der G. Measurement of heat conductivity of sedimentary rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1956;40: 2475–2488. <https://doi.org/10.1306/5CEAE5A4-16BB-11D7-8645000102C1865D>
- Zierfuss H. Heat conductivity of some carbonate rocks and clayey sandstones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1969;53: 251–260. <https://doi.org/10.1306/5D25C607-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Meincke W., Hurtig E., and Weiner J. Temperaturteilung, Wärmeleitfähigkeit und Wärmefluss in Thuringer Becken. *Geophysik und Geologic*. 1967;(11): 40–71.
- Ki-iti Horai. Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*. 1971;76(5): 1278–1308. <https://doi.org/10.1029/jb076i005p01278>
- Beck A. E., Anglin F. M., Sass, J. H. Analysis of heat flow data-in situ thermal conductivity measurements. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1971;8: 1–19. <https://doi.org/10.1139/e71-001>
- Thomas J., Jr. Frost R. R., Harvey R. D. Thermal conductivity of carbonate rocks *Engineering Geology*. 1973;7(4): 3–12. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90003-3)
- Robertson E. C. Thermal properties of rocks. *Open-File Report*. 1988; 88–441. Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/ofr88441>
- Shin K., Kinoshita N., Okuno T. Mechanical, thermal properties and permeability of rocks under high temperature. *Journals Free Access*. 1988;29(3): 242–253. <https://doi.org/10.5110/jjseg.29.242>
- García E., de Pablos A., Bengoechea M. A., Guaita L., Osendi M. I., Miranzo P. Thermal conductivity studies on ceramic floor tiles. *Ceramics International*. 2011;37(1): 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.023>
- Clauser C., Huenges E. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. In: *Rock Physics and Phase Relations: a Handbook of Physical Constants*. Ed. Ahrens T. J. 1995;3: 105–126 (print). *American Geophysical Union*, 2013 (on line). <https://doi.org/10.1029/rf003p0105>
- Эмиров С. Н., Ибрагимов А. И., Рамазанова Э. Н. Тепловые свойства осадочных горных пород в условиях их естественного залегания. *Научно-методический электронный журнал концепт*. 2013;13: 1096–1100. Режим доступа: <https://e-koncept.ru/2013/53222.htm>
- Merriman J. D., Hofmeister A. M., Roy D. J., Whittington A. G. Temperature-dependent thermal transport properties of carbonate minerals and rocks. *Geosphere*. 2018;14(4): 1961–1987. <https://doi.org/10.1130/GES01581.1>
- Семенов В. П., Железняк М. Н., Кириллин А. Р., Жижин В. И. Теплопроводность осадочных горных пород лено-вилуйской нефтегазоносной

- провинции. *Криосфера Земли*. 2018;22(5): 30–38. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-5\(30-38\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-5(30-38))
16. Lindawati L., Yuliza N. F., Irwansyah I. Thermal Conductivity of Some Marble Stones Available in South Aceh District. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;854: 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/854/1/012064>
17. Momenzadeh L., Moghtaderi B., Liu X., Sloan S. W., Belova I. V., Murch G. E. The thermal conductivity of magnesite. Dolomite and calcite as determined by molecular dynamics simulation. *Diffusion Foundations*. 2018;19: 18–34. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.19.18>
18. Попов П. А., Дукельский К. В., Миронов И. А., Смирнов А. Н., Смолянский П. Л., Федоров П. П., Осико В. В., Басиев Т. Т. Теплопроводность оптической керамики из CaF_2 . *Доклады РАН*. 2007;412(2): 185–187. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9483974>
19. Попов П. А., Федоров П. П., Кузнецов С. В. Теплопроводность кристалла пирита FeS_2 в интервале температур 50–300 К. *Кристаллография*. 2013;58(2): 302–304. <https://doi.org/10.7868/s0023476113020227>
20. Fedorov P. P., Maslov V. A., Voronov V. V., Chernova E. V., Yarotskaya E. G., Gaynutdinov R. V., Popov P. A. Flintstone as nanocomposite material. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2018;9(5): 603–608. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2018-9-5-603-608>
21. Попов П. А., Кузнецов С. В., Круговых А. А., Митрошенков Н. В., Балабанов С. С., Федоров П. П. Исследование теплопроводности PbS , CuFeS_2 , ZnS . Конденсированные среды и межфазные границы. 2020;22(1): 97–105. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2533>
22. Fedorov P. P., Novikov I. A., Voronov V. V., Bad'yanova L. V., Kuznetsov S. V., Chernova E. V. Transformation of siderite in the zone of hypergenesis. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2022;13(5): 539–545. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2022-13-5-539-545>
23. Popov P. A., Sidorov A. A., Kul'chenkov E. A., Anishchenko A. M., Avetissov I. Ch., Sorokin N. I., Fedorov P. P. Thermal conductivity and expansion of PbF_2 single crystal. *Ionics*. 2017;23(1): 233–239. <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1802-2>
24. Goldsmith J. R., Heard H. C. Subsolidus phase relations in the system CaCO_3 – MgCO_3 . *Journal of Geology*. 1961;69(1): 45–74. <https://doi.org/10.1086/626715>
25. Vinn O. Calcite in skeletons of annelids. In: *Calcite: formation, properties and applications*. NOVA Science Publ.; 2012. p. 245.
26. Оскотский В. С., Смирнов И. А. *Дефекты в кристаллах и теплопроводность*. М.: Наука; 1972. 159 с.
27. Займан Дж. *Электроны и фононы*. М.: И.Л.; 1962. 1124 с.
28. *Теплопроводность твердых тел: Справочник под ред. А. С. Охотина*. М.: Энергоатомиздат; 1984. 320 с.
29. Klemens P. G. The thermal conductivity of dielectric solids at low temperatures (Theoretical). *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1951;208(1092): 108–133. <https://doi.org/10.1098/rspa.1951.0147>
30. Берман П. *Теплопроводность твердых тел*. М.: Мир; 1979. 286 с.
31. Попов П. А., Федоров П. П. *Теплопроводность фторидных оптических материалов*. Брянск: Группа компаний «Десяточка»; 2012. 210 с.

Информация об авторах

Попов Павел Аркадьевич, д. ф.- м. н., профессор, Брянский государственный университет им. И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0001-7555-1390>
tfbgubry@mail.ru

Зенцова Алена Андреевна, студентка, Брянский государственный университет им. И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-9793-7099>
alenazen01@mail.ru

Новиков Иван Александрович, н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0003-4898-4662>
i.novikov@niigb.ru

Воронov Валерий Вениаминович, к. ф.-м. н., в. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0001-5029-8560>
voronov@lst.gpi.ru

Чернова Елена Владимировна, м. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0001-7401-5019>
e-chernova@yandex.ru

Федоров Павел Павлович, д. х. н., профессор, гл. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-2918-3926>
ppfedorov@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023; одобрена после рецензирования 10.07.2023; принята к публикации 15.09.2023; опубликована онлайн 25.03.2024.