

УДК 536.2.023+536.2.083+536.631

И.Н. Середкин

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Рассмотрены методы измерения теплофизических свойств горных пород, погрешность, принципы работы установок.

Ключевые слова: горные породы, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность.

Данные о теплофизических свойствах горных пород являются ключевым параметром для численных моделей геотермальных систем [1], кроме того они необходимы для работ по определению тепловых потоков, оценке тепловых ресурсов геотермальных систем и месторождений и проектированию систем разработки [2]. К теплофизическим свойствам относят теплопроводность, удельную теплоемкость и температуропроводность [3]. Для пород геотермальных систем и месторождений Камчатки недавние результаты определения теплофизических свойств приведены в работах [4] и [5]. В настоящее время наиболее распространены следующие методы измерения теплофизических свойств горных пород.

Метод разделенного стержня. Образец в форме диска помещают между двумя дисками из эталонного материала с известной теплопроводностью, температуру которых поддерживают постоянной [6]. После достижения стационарного состояния теплопроводность образца определяют путем сравнения перепада температур по его высоте с перепадом в эталонном материале [7]. Метод требует больших временных затрат, однако является эталоном точности и позволяет устанавливать анизотропию теплофизических свойств горных пород. В [6] создана лабораторная установка, которая определяет коэффициент теплопроводности мелкозернистых пород. Окончательное значение теплопроводности образца получают из нескольких определений, повышая таким образом надежность результата.

Метод линейного источника. В приборах, основанных на этом методе, используют тонкий зонд с нагревательным элементом и температурным датчиком [7,8]. В отличие от стационарных методов отсутствует необходимость установления теплового равновесия, за счет чего результат достигается быстрее. Для получения значения теплопроводности образца применяется теоретическая модель, определяющая величину температурного отклика на тепловой импульс. Зонд вводят в материал несцементированных пород, либо размещают на поверхности образца из твердых пород. Такой способ хорошо подходит для проведения измерений тепловых свойств рыхлых пород. Исследуя корреляцию между плотностью и теплопроводностью, авторы [8] использовали для горных пород метод разделенного стержня, а для несцементированных пород применялся метод линейного источника. Приборы были предварительно протестированы и показали хорошую сходимость измерений. В [9], где также сравнивались эти методы, рассматривались аппарат Геологической службы США и прибор Quick Thermal Conductivity Meter (QTM), работающий по методу линейного источника. Для QTM была отмечена простая и быстрая пробоподготовка, а также нечувствительность к небольшой шероховатости поверхности. При этом прибор QTM требует достаточно крупные образцы керна (30 мм × 60 мм × 100 мм). Благодаря компактности, устройства такого типа получили широкое распространение, а возможность определения теплопроводности в анизотропных средах [10] сделали их практически универсальными.

Метод горячей охранной зоны. На приборе с горячей охранной зоной определяют термическое сопротивление, эффективную теплопроводность и плотность стационарного теплового потока через образец. Для этого измеряют электрическую мощность, подаваемую на нагреватель горячей плиты прибора. В [11] математически оценена точность измерения и показано, что такой метод является в достаточной степени надежным.

Метод лазерной вспышки. Указанным методом можно измерять температуропроводность. При проведении измерений фронтальная поверхность образца нагревается коротким лазерным импульсом. Вызванное изменение температуры регистрируется на тыльной поверхности образца. Кроме того, методом лазерной вспышки с использованием данных эталонного

образца может быть определена удельная теплоемкость твердых веществ. В [12] применялся прибор Netzsch™ LFA 427, использующий указанный метод для определения тепловых свойств образцов магматических горных пород.

Фототермический метод. В [3] использовались фотоакустическая ячейка для измерения температуропроводности. Измерение температуры при непрерывном освещении использовалось для получения значения объемной теплоемкости. На основе этих данных также определена теплопроводность трех типов осадочных пород, и результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в литературе.

Таблица 1

Характеристики методов измерения теплопроводности горных пород

Наименование	Погрешность	Разработчик (год)	Породы (месторождения), для которых использовался метод, литературный источник
Метод разделенного стержня	5 %	Benfield (1939), Bullard (1939)	боросиликатное стекло, гипс, известняк, филлит, доломит, ангидрит (Po Basin, Австралия) [6,8]
Метод линейного источника	2,5-18 %	Шушпанов А.П. (1960)	базальт, доломит, мрамор, гранит (Бельгия) [9,10,16]
Метод горячей охранной зоны	2,9 %	Woodside (1956)	[11]
Метод лазерной вспышки	2 %	Parker (1961)	амфиболит (Complex Abitibi, США), щелочной базальт (Salisbury Crags, Великобритания) [12]
Фототермический метод	3-13 %	Vargas, Miranda (1988)	песчаник (Botucatu), черный сланец, известняк (Irati, Бразилия) [3]
Метод оптического сканирования	1,6 %	Popov (1983)	алевролиты, песчаники (Ярегское месторождение, Россия, КТВ Pilot Hole, Германия) [7,13]
Метод инверсионного моделирования	2,2 %	Kiryukhin (2010)	брекчии, туфы, лавы (Рогожниковский резервуар) риодациты, туфы (Долина Гейзеров, Камчатка, Россия) [15]

Метод оптического сканирования. Установка оптического сканирования была разработана Ю.А. Поповым [7,13] и позволяет определять теплопроводность и температуропроводность, нагревая небольшую область образца при помощи лазера. Затем инфракрасные датчики, движущиеся за источником, измеряют температуру на поверхности образца. Для расчета значений теплопроводности и температуропроводности по линии сканирования используется теоретическая модель [7,13]. Таким методом можно устанавливать анизотропию теплофизических свойств пород путем сканирования в трех разных направлениях. Достоинствами метода являются низкие значения случайных ошибок, способность определять изменения теплопроводности вдоль линии сканирования, возможность анализа на глубину до 3 см и более (для образцов с теплопроводностью выше 6 Вт/мК) при низкой скорости сканирования, отсутствие ограничений по размерам и форме образцов, качеству механической обработки их поверхности [7]. Прибор такого типа используют для измерений при комнатной температуре и атмосферном давлении [14].

Метод инверсионного моделирования. В [15] приведена лабораторная установка, имеющая четыре независимых теплоизолированных нагревателя. С помощью термозондов регистрируются изменения температуры, а затем моделируется прохождение температурного фронта с использованием программы TOUNG2, и вычисляется теплопроводность и удельная теплоемкость. Лабораторная установка работает при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Как можно заключить из вышеизложенного, некоторые методы имеют высокие ошибки измерения (табл.1), применимы не для всех типов пород. Наиболее точный метод оптического сканирования, позволяющий устанавливать анизотропию теплофизических свойств пород, не обеспечивает возможность измерений при пластовых условиях (высоких давлениях и температуре). Таким образом, необходимо дальнейшее развитие существующих методов определения теплофизических свойств горных пород, а также приборной базы для их реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sipioa E.D., Chiesab S., Destroa E., Galgaroa A., Giaretta A., Golad G., Manzellad A.* Rock Thermal Conductivity as Key Parameter for Geothermal Numerical Models // *Energy Procedia*. 2013. № 40. С. 87–94.
2. *Пашкевич Р.И.* Влияние свойств горных пород на результаты численного моделирования эксплуатации геотермальных систем // *ГИАБ. ОВ 2 «Камчатка» (специальный выпуск)*. – 2014. – С.36-46.
3. *Guimarges A.O., Viana D.A., Cordeiro T.C., Sampaio J.A., da Silva E.C., Toledo R. Ribeiro H.J.P.S., Carrasquilla A.A.G., Vargas H.* On the use of photo-thermal methods for thermal characterization of sedimentary rocks from the Paranб Basin in Brazil // *Marine and Petroleum Geology*. 2013. Vol. 43. С. 121–126.
4. *Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Тарелко Н.Ф., Чернев И.И., Павлов К.А., Муратов П.В.* Новые данные о тепловых свойствах пород геотермальных месторождений Камчатки // *ГИАБ. ОВ 2 «Камчатка» (специальный выпуск)*. – 2014. – С.36-46.
5. *Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Савельев Е.Г., Ромушкевич Р.А., Павлов К.А.* Экспериментальные исследования тепловых свойств пород Авачинской геотермальной системы // *ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2»*, 2015, С. 7–23.
6. *Pasquale V., Verdoya M., Chiozzi P.* Measurements of rock thermal conductivity with a Transient Divided Bar // *Geothermics*. 2015. Vol. 53. С. 183–189.
7. *Попов Y.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H., Williams C.F., Burkhardt H.* Characterization of Rock Thermal Conductivity by High-Resolution Optical Scanning // *Geothermics*. 1999. Vol. 28, No. 2. С. 253–276.
8. *Barry-Macaulay D., Bouazza A., Singh R.M., Wang B., Ranjith P.G.* Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region // *Engineering Geology*. 2013. Vol. 164. С. 131–138.
9. *Sass J.H., Stone C., Munroe R.J.* Thermal conductivity determinations on solid rock a comparison between a steady-state divided-bar apparatus and a commercial a transient line-source device // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1984. Vol. 20. С. 145–153.
10. *Dao L.Q., Delage P., Tang A.M., Cui Y. — J., Pereira J.M., Li X.L., Silenc X.* Anisotropic thermal conductivity of natural Boom Clay // *Applied Clay Science*. 2014. Vol. 101. С. 282–287.
11. *Hammerschmidt U.* Guarded Hot-Plate (GHP) Method: Uncertainty Assessment // *International Journal of Thermophysics*. 2002. Vol. 23, no. 6. С. 1551-1570.
12. *Merrimana J.D., Whittington A.G., Hofmeister A.M., Nabeleka P.I., Benn K.* Thermal transport properties of major Archean rock types to high temperature and implications for cratonic geotherms // *Precambrian Research*. 2013. Vol. 233. С. 358–372.
13. *Попов Ю.А.* Теоретические модели для определения тепловых свойств горных пород на основе подвижных источников тепловой энергии // *Известия вузов. Сер. «Геология и разведка»*. – 1983. – № 9. – Статья 1. С. 97–105; 1984. – № 2. – Статья 2. – С. 83–91.

14. Вертоградский В.А., Попов Ю.А. Миклашевский Д.Е. Метод и установка для измерения теплопроводности горных пород при высоких давлениях и температурах // Известия высших учебных заведений. Сер. «Геология и разведка». – 2003. – № 5. – С. 47–51.

15. Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Мушинский А.В. Измерения теплопроводности и удельной теплоемкости на примере вулканогенных горных пород // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 5. – С.27–37.

16. Шушпанов А. П., Шушпанов П. И. К методу цилиндрического источника тепла для определения теплофизических коэффициентов // Инженерно-физический журнал. – 1960. – №3. – С. 74–77. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Середкин Илья Николаевич – младший научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 536.2.023+536.2.083+536.631

MEASUREMENT METHODS OF ROCKS' THERMAL PROPERTIES

Seredkin I.N., Junior Research Associate, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

The methods for measuring thermal properties of rocks, errors and principles of devices are reviewed.

Key words: rocks, specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity.

REFERENCES

1. Sipioa E.D., Chiesab S., Destroa E., Galgaroa A., Giarettaa A., Golad G., Manzelad A., *Energy Procedia* (Energy Procedia), 2013, No. 40, pp. 87–94.

2. Pashkevich R.I. *Vlijanie svojstv gornyh porod na rezultaty chislennogo modelirovaniya jekspluatacii geotermalnyh system* (The Influence of rock properties on the results of numerical modeling of exploitation geothermal systems), *GIAB, OV 2, «Kamchatka»* (special issue), 2014, pp.36-46.

3. Guimarras A.O., Viana D.A., Cordeiro T.C., Sampaio J.A., da Silva E.C., Toledo R. Ribeiro H.J.P.S., Carrasquilla A.A.G., Vargas H. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, Vol. 43, pp. 121–126.

4. Pashkevich R.I., Popov E.Yu., Tarelko N.F., Chernev I.I., Pavlov K.A., Muratov P.V. *Novyye dannyye o teplovykh svoystvakh porod geotermalnykh mestorozhdeniy Kam-*

chatki (New data on thermal rock properties geothermal fields of Kamchatka), GIAB, OV 2, «Kamchatka» (special issue), 2014, pp.36-46.

5. Pashkevich R.I., Popov E.Yu., Savelyev E.G., Romushkevich R.A, Pavlov K.A. *Eksperimentalnye issledovaniya teplovykh svoystv porod Avachinskoy geotermalnoy sistemy* (Experimental investigation of thermal properties of rocks of Avachinsky geothermal system), GIAB No 11, «Kamchatka-2» (special issue), 2015. pp. 7–23.

6. Pasquale V., Verdoya M., Chiozzi P. *Geothermics*, 2015, Vol. 53, pp. 183–189.

7. Popov Y.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H., Williams C.F., Burkhardt H. *Geothermics*, 1999, Vol. 28, no. 2, pp. 253–276.

8. Barry-Macaulay D., Bouazza A., Singh R.M., Wang B., Ranjith P.G. *Engineering Geology*, 2013, Vol. 164, pp. 131–138.

9. Sass J.H., Stone C., Munroe R.J. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1984, Vol. 20, pp. 145–153.

10. Dao L.Q., Delage P., Tang A.M., Cui Y.-J., Pereira J.M., Li X.L., Sillenc X. *Applied Clay Science*, 2014, Vol. 101, pp. 282–287.

11. Hammerschmidt U. *International Journal of Thermophysics*, 2002, Vol. 23, no. 6, pp. 1551-1570.

12. Merrimana J.D., Whittington A.G., Hofmeister A.M., Nabeleka P.I., Benn K. *Precambrian Research*, 2013, Vol. 233, pp. 358–372.

13. Popov Yu.A. *Teoreticheskie modeli dlya opredeleniya teplovykh svoystv gornyh porod na osnove podvizhnykh istochnikov teplovoj ehnergii* (Theoretical model for determining thermal properties of rocks on the basis of movable sources of thermal energy), *Izvestiya vuzov, seriya «Geologiya i razvedka»*, 1983, Statya 1, No 9, pp. 97–105; 1984, Statya 2, No 2, pp. 83–91.

14. Vertogradskij V.A., Popov Yu.A. Miklashevskij D.E. *Metod i ustanovka dlja izmerenija teploprovodnosti gornyh porod pri vysokih davlenijah i temperaturah* (Method and apparatus for measurement of thermal conductivity of rocks at high pressures and temperatures), *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij, Seriya, «Geologiya i razvedka»*, 2003, No 5, pp. 47–51.

15. Kirjuhin A.V., Poljakov A.Ju., Mushinskij A.V. *Izmerenija teploprovodnosti i udelnoj teploemkosti na primere vulkanogennykh gornyh porod* (Measurement of thermal conductivity and specific heat capacity example on the volcanic rocks), *Vulkanologiya i seismologiya*, 2014, No. 5, pp. 27–37.

16. Shushpanov A. P., Shushpanov P. I. *K metodu tsilindricheskogo istochnika tepla dlya opredeleniya teplofizicheskikh koeffitsiyentov* (To a method cylindrical heat source for the determination of thermophysical coefficients), *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1960, Vol. 3 pp.74-77.