

## **КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИГОЛЬЧАТОГО ЗОНДА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

*Ирина Игоревна Фадеева*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер; Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, тел. (953)763-95-28, e-mail: fadeevaii@ipgg.sbras.ru

В докладе приводится описание разработанного зондового устройства для оперативного измерения температуропроводности и теплопроводности разного рода сред. С помощью устройства проведены тестовые измерения температуропроводности льда и соли.

**Ключевые слова:** игольчатый зонд, прибор для измерения температуропроводности и теплопроводности, лабораторный эксперимент.

## **STRUCTURAL FEATURES OF NEEDLE PROBE, WHICH USED TO DETERMINE THE THERMAL PROPERTIES OF ROCKS**

*Irina I. Fadeeva*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer; Chinackal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospect, Research Scientist, tel. (953)763-95-28, e-mail: fadeevaii@ipgg.sbras.ru

The description of the thermal probe construction and performance of a device for measuring thermal properties of different sorts of media is given. The results of measurements of the thermal diffusivity of ice and salt are given.

**Key words:** needle probe, thermal conductivity, thermal diffusivity.

Большинство горных пород, являясь сложными многокомпонентными системами, характеризуются эффективными теплофизическими свойствами. В методах определения теплофизических свойств горных пород можно выделить два направления: экспериментальный и теоретический. Экспериментальные исследования остаются основными в силу большого разнообразия исследуемых пород. Их можно осуществлять как непосредственно в естественно залегающем массиве пород (полевые исследования), так и в лабораторных условиях. Полевые исследования тепловых свойств играют немаловажную роль как в экспедиционных работах, так и в производственных условиях. Такие исследования могут проводиться на основе анализа данных наблюдений естественного температурного поля массива пород или зондовыми методами. В первом случае недостатком является трудоемкость проведения температурных наблюдений и значительная погрешность в определении коэффициента температуропроводности пород. Зондовые методы более удобны в практической реализации, основаны на искусственном нарушении температурного поля массива породы и измере-

нии скорости его изменения. По форме зонды бывают плоские, сферические и цилиндрические. По тепловому режиму работы различают зонды с постоянной мощностью теплового потока, с импульсным нагревом и другие варианты [1].

Широкое применение получил метод длинного игольчатого зонда (с соотношением диаметра  $D$  и длины  $L$  зонда  $L/D \geq 30$ ). Теория метода была разработана Блэквеллом [2, 3] и Хупером [4]. Несмотря на то, что теория Блэквелла предполагает определение двух параметров тепло- и температуропроводности среды, реализованные зонды, как правило, с хорошей точностью позволяют измерять один параметр теплопроводности исследуемой породы [5, 6]. Теория метода определения теплопроводности состоит в интерпретации термограмм зонда на больших временах при постоянной мощности линейного источника. Методика определения температуропроводности также была описана в работе Вэйта [7], она опирается на математические выкладки, сделанные Блэквеллом [2], и заключается в описании термограммы как на больших, так и на малых временах (начало прогрева среды зондом постоянной мощности). В работе Вэйта [7] нами были отмечены несоответствия в размерностях уравнений. После корректировки этих несоответствий теория была опробована, но в силу того, что решения оказались неустойчивыми, рассчитанные параметры имели существенную погрешность. Позже выяснилось, что связано это с особенностью конструкции игольчатого зонда. В ходе выполнения очередного эксперимента был выявлен серьезный конструктивный недостаток игольчатых зондов, изготавливаемых с применением трансформаторного масла в качестве наполнителя. Если герметизация зонда оказывалась недостаточно плотной, происходило неконтролируемое вытекание масла, что уменьшало собственную теплопроводность зонда и увеличивало его инерцию. Исследования зонда, заполняемого эпоксидной смолой, также показали его несостоятельность в измерении температуропроводности исследуемой среды описанным методом [2, 7].

Математическая модель метода игольчатого зонда в качестве источника рассматривает тонкую бесконечно длинную нить. Таким образом, используемое для описания экспериментальных термограмм аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с линейным источником тепла постоянной мощности (1) справедливо в случае, когда длина зонда превосходит его диаметр в 25–30 раз [2, 3]. Ранее при изготовлении зондов мы уделяли внимание соблюдению только этого параметра геометрии.

$$T(r_0, t) = T_i + \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \cdot E_1\left(\frac{r_0^2}{4a_2 t}\right), \quad (1)$$

где  $T_i$  [К] – температура исследуемой среды в начальный момент времени ( $t = 0$ ),  $Q$  [Вт/м] – удельная мощность источника,  $\lambda_2$  [Вт/м/К] – теплопроводность среды,  $a_2$  [м<sup>2</sup>/с] – температуропроводность среды,  $r_0$  – радиус зонда [8].

В 2015 году был изготовлен новый измерительный зонд, в котором, помимо соотношения длины нагревателя и диаметра зонда, особое внимание было уделено центровке нагревательной проволоки, расположению температурного датчика, его инертности и инерции зонда в целом, что позволило приблизить зонд к его модельному представлению. Регистрирующая система при этом осталась прежней, ее схема приведена в работе [9].

Основная проблема контактных методов измерения тепловых свойств различных сред состоит в определении теплового контактного сопротивления на границе источник-среда, которое необходимо учитывать при определении теплопроводности исследуемой среды. При создании достаточно хорошего теплового контакта на границе игольчатый зонд-среда, такого, что температура стенки зонда отличается от температуры среды менее чем на величину погрешности измерения температуры, можно выявить конструктивные недостатки зонда в процессе его исследования. Хороший тепловой контакт, как известно, наблюдается при вмораживании игольчатого зонда в лед.

В данной работе проведены измерения тепловых свойств льда, полученные с помощью двух одноигольчатых зондов, замороженных в лед (рис. 1). Зонд 1 был изготовлен по старой технологии, зонд 2 – по новой. Представлены термограммы, полученные при постоянной мощности линейного нагревателя (рис. 1, а) и при заданной зависимости от времени тепловой мощности нагревателя (рис. 1, б).

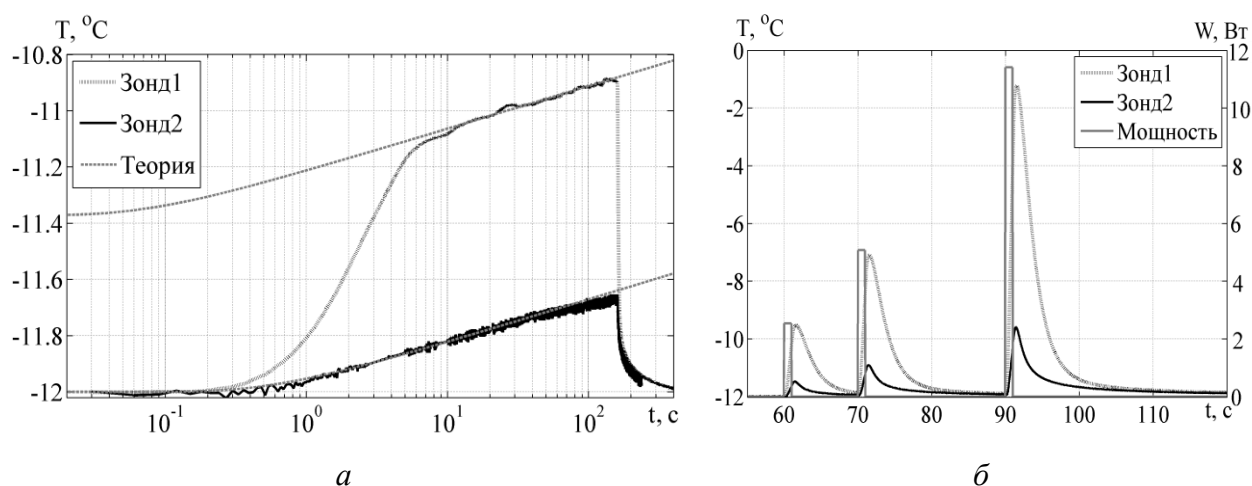


Рис. 1. Экспериментальные термограммы двух игольчатых зондов (зонд 1 и зонд 2), полученные при постоянной мощности нагревателя (а) и заданной зависимости мощности, подаваемой на линейный нагреватель зонда, от времени (б)

На рис. 1, а хорошо виден начальный нелинейный прогрев температурного датчика зонда 1 (температура датчика отличается от температуры среды вблизи зонда на некоторое постоянное в течение всего времени нагрева значение [10]), в то время как для температурного датчика зонда 2 начальная стадия прогрева

практически отсутствует (температура датчика соответствует температуре окружающей среды). Таким образом, температурный скачок может быть следствием конструктивного недочета – плохого контакта температурного датчика со стенкой игольчатого зонда.

Теплопроводность льда определялась при аппроксимации термограмм (рис. 1, *а*) аналитическим решением (1), представленным штриховой пунктирной линией, и составила 2,5 Вт/м/К для термограммы зонда 1 и 2,4 Вт/м/К для термограммы зонда 2.

В силу хорошего теплового контакта зондов и льда (коэффициент теплообмена  $H > 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>/К) скачком температуры на границе зонд-лед можно пренебречь, тогда температуропроводность может быть определена при аппроксимации термограммы зонда 2 (рис. 1, *а*) решением (1) [8] и составляет  $6,7 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Также температуропроводность можно определить по методу, предложенному в работе [11], используя для этого тепловой сигнал и соответствующие ему термограммы, представленные на рис. 1, *б*. В результате решения обратной задачи было отмечено, что функционал, построенный с использованием экспериментальных данных, полученных зондом 2, имеет единственный минимум, соответствующий температуропроводности  $7,0 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, в то время как функционал, построенный с использованием данных зонда 1, не имеет строго выраженного минимума. Это, по всей видимости, связано с сильным несоответствием экспериментальной термограммы тепловому сигналу.

С использованием нового игольчатого зонда 2 проводились исследования тепловых свойств соли. По методу, предложенному в работе [11], были определены следующие параметры: теплопроводность 0,46 Вт/м/К, коэффициент теплообмена на границе зонд-соль 360 Вт/м<sup>2</sup>/К, температуропроводность  $1,3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

Наши исследования показали, что методики определения тепловых свойств горных пород с использованием игольчатого зонда [2, 3, 7, 8, 11] работают при условии, что одноигольчатый зонд изготовлен по специальной технологии, обеспечивающей необходимое соотношение длина-диаметр, высокую собственную теплопроводность, соответствие температуры датчика зонда температуре его стенки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 280 с.
2. Blackwell J.H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk // *J. app. Phys.* – 1954. – Vol. 25(2). – P. 137–144.
3. Blackwell J.H. The axial-flow error in the thermal-conductivity probe // *Canadian Journal of Physics.* – 1956. – Vol. 34. – P. 412–417.
4. Хупер Ф.К. Зонд для измерения теплопроводности // Мерзлотные явления в грунтах. – Л.-М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – С. 81–84.
5. Von Herszen R., Maxwell A.E.. The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method // *Journal of Geophysical Research.* – 1959. – Vol. 64, Issue 10. – P. 1557–1563.

6. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Тепловой поток через дно западной части Черного моря // Геология и геофизика. – 1985. – № 8. – С. 113–123.
7. Simultaneous determination of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat in sI methane hydrate / W.F. Waite, L.A. Stern, S.H. Kirby et al. // Geophys. J. Int. – 2007. – Vol. 169. – P. 767–774.
8. Фадеева И.И., Дучков А.А., Пермяков М.Е. Теплофизический метод количественной оценки гидратосодержания в образцах, имитирующих донные осадки // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 6. – С. 1251–1261.
9. Казанцев С. А., Фадеева И. И. Устройство для оперативного измерения температуропроводности слабосцементированных пород // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Международный науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 82–85.
10. Методика одновременного измерения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости среды игольчатым зондом / И.И. Фадеева, М.Е. Пермяков, Д.Е. Аюнов, Н.А. Манченко // Трофимуковские чтения – 2013: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск, 2013. – С. 342–327.
11. Фадеева И. И., Дучков А. А., Карчевский А. Л. Теория метода игольчатого зонда для одновременного определения тепло- и температуропроводности различных сред // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Международный науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 3. – С. 124–128.

© И. И. Фадеева, 2017