

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИНЕЙНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Ирина Игоревна Фадеева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, тел. (953)763-95-28, научный сотрудник, e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Евгеньевич Аюнов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, тел. (383)330-03-99, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, тел. (383)363-67-14, кандидат физико-математических наук, зав. лаборатории динамических проблем сейсмологии, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Исследуются направления развития метода измерения теплофизических параметров среды на основе линейного источника. Изучено влияние формы теплового сигнала источника на чувствительность соответствующей этому сигналу термограммы к параметру температуропроводности среды. Рассмотрена возможность одновременного определения параметров тепло- и температуропроводности исследуемой среды с помощью теории разогрева цилиндрического источника с известными тепловыми свойствами. Обосновывается возможность определения теплофизических параметров по термограммам пилообразного теплового импульса.

Ключевые слова: геотермический зонд, геотермические исследования осадков, линейный источник, моделирование температурного поля, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость.

DEVELOPMENT OF NON-STATIONARY METHOD OF A LINEAR SOURCE FOR THERMOPHYSICAL PARAMETERS DETERMINATION

Irina I. Fadeeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (953)763-95-28, e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Dmitry E. Ayunov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)333-03-99, e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: (383)363-67-14, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

The development directions of the classical method for measuring the thermophysical parameters of the medium on the basis of a linear source are investigated. The influence of the thermal waveform source on the sensitivity of the probe thermogram (temperature change over time) to medium thermal diffusivity is considered. The possibility of determining thermal conductivity and thermal diffusivity using a single-needle probe with known thermal properties is considered. The possibility of determining thermophysical parameters using thermograms of a saw-tooth heat pulse is substantiated.

Key words: geothermal probe, geothermal studies of precipitation, linear source, temperature field modeling, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity.

Применение математических методов к задачам теплопроводности широко освещены в книгах Карслоу и Егера [Карслоу, Егер, 1964], а также в работах [de Vries, 1952; Kluitenberg, 1993; Bristow et al., 1994] и других.

Теорию постоянного разогрева линейного источника в исследуемой среде (1) или решение задачи нагрева среды линейным источником используют для определения параметра теплопроводности этой среды с помощью одно-игольчатого зонда постоянной мощности [ASTM, 2000; Von Herzen, Maxwell, 1959]. Для определения теплоемкости, с помощью двух-игольчатого зонда сначала было предложено использовать теорию мгновенного теплового импульса – решение задачи остывания исследуемой среды (2) [Campbell, 1991], однако Kluitenberg заметил, что предположение о мгновенности испускаемого линейным источником импульса приводит к ошибке в определении теплоемкости, и исследовали влияние длительности короткого импульса на измерения тепловых свойств [Kluitenberg, 1993].

$$T(r,t) - T_0 = + \frac{Q}{4\pi\lambda} \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right). \quad (1)$$

$$T(r,t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda t} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right). \quad (2)$$

где $T(r,t)$ и $T_0 = T(r,0)$ – текущая и начальная температура среды в момент времени $t > 0$ и $t = 0$ соответственно, на расстоянии r от оси на которой расположен линейный нагреватель; q – постоянное количество тепла испускаемое в окружающую среду с единицы длины; Q – постоянное количество тепла испускаемое в окружающую среду с единицы длины в единицу времени; λ , a – тепло-

проводность и температуропроводности среды соответственно; $E_1(s) = \int_s^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$ –

интегральная показательная функция, которая на больших временах, а именно при малых значениях $s = r^2/4at \ll 1$, принимает вид: $E_1(s) \approx -\gamma - \ln s$.

Используемые для нахождения тепловых свойств аналитические решения получены при длительном и коротком нагреве исследуемой среды линейным

источником постоянной тепловой мощности. Если же выделяемая тепловая мощность не постоянна и определенным образом изменяется во времени, то термограмма источника (изменение температуры линейного источника во времени) будет иметь сложную форму, которая, вероятно, будет иметь определенную чувствительность к тепловым свойствам исследуемой среды.

1) Влияние формы сигнала источника на чувствительность термограммы к теплофизическим параметрам.

Был проведен ряд численных экспериментов по выявлению формы теплового сигнала линейного нагревателя, которой соответствует термограмма с большей чувствительностью к теплопроводности исследуемой среды. Для этого численно рассчитаны соответствующие приведенным на рис. 1 тепловым сигналам термограммы однородного цилиндрического зонда с тепловыми свойствами ($\lambda=16$ Вт/м/К, $\rho=9000$ кг/м³, $C_p=200$ Дж/кг/К), расположенного в однородной модельной среде ($\lambda=2.3$ Вт/м/К, $\rho=1000$ кг/м³, $C_p=1000$ Дж/кг/К). На оси зонда моделировалась нагревательная проволока, в средней его части, на стенке - температурный датчик. На нагревательной проволоке выделялась изменяющаяся во времени тепловая мощность. Общая тепловая энергия, выделенная за время нагрева (300 с) для всех исследуемых форм сигналов составила 600 Дж. Тепловые сигналы 6i20W5s, 6i10W10s, 12i10W5s, 12i5W10s – прямоугольные импульсы различной амплитуды и длительности, LinDw – линейно уменьшающаяся мощность, StepDw и StepUp – ступенчатые нагревы, представлены на верхнем графике рис. 1, а. На нижнем графике (рис. 1а) красной линией изображен пилообразный сигнал (Triangles), а голубой линией соответствующая ему численная термограмма.

Чувствительность термограммы теплового сигнала заданной формы к параметру теплопроводности среды определяется кривизной функционала невязки вблизи минимума, определяемого по следующей формуле:

$$J(a_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k^N |T(a_i, t_k) - T^m(t_k)|^2}, \quad (3)$$

где t_k – k -ый момент времени, T^m - термограмма зонда для среды (Среда m) с параметрами: $\lambda=2.3$ Вт/м/К, $\rho=1000$ кг/м³, $C_p=1000$ Дж/кг/К ($a=2.3e-6$ м²/с); $T(a_i)$ – термограмма зонда расположенного в i -ой среде с $\lambda=2.3$ Вт/м/К, $\rho=1000$ кг/м³ и C_{pi} изменяемой от 600 до 1400 Дж/кг/К, соответственно теплопроводность $a_i = \lambda/(\rho C_{pi})$.

Функционал невязки (3) в зависимости от варьируемой теплопроводности для разных тепловых сигналов, представлен справа на рис. 1, б. Const2 – тепловой сигнал постоянной мощности. Подаваемые на линейный нагреватель зонда тепловые сигналы расположены в легенде сверху вниз в порядке уменьшения чувствительности термограммы теплового сигнала к теплопроводности исследуемой среды. Из графика (рис. 1б) видно, что термограмма цилиндрического зонда с резкими изменениями температуры наиболее чув-

ствительна к параметру теплопроводности среды. Это обеспечивается прогревом среды на большее значение температуры. Однако в силу того, что тепловые свойства сред также зависят от температуры, сильные изменения температуры в процессе измерений нежелательны. Можно заключить, что в условиях ограничения диапазона изменения температуры среды, усложнение теплового сигнала не приводит к большому выигрышу.

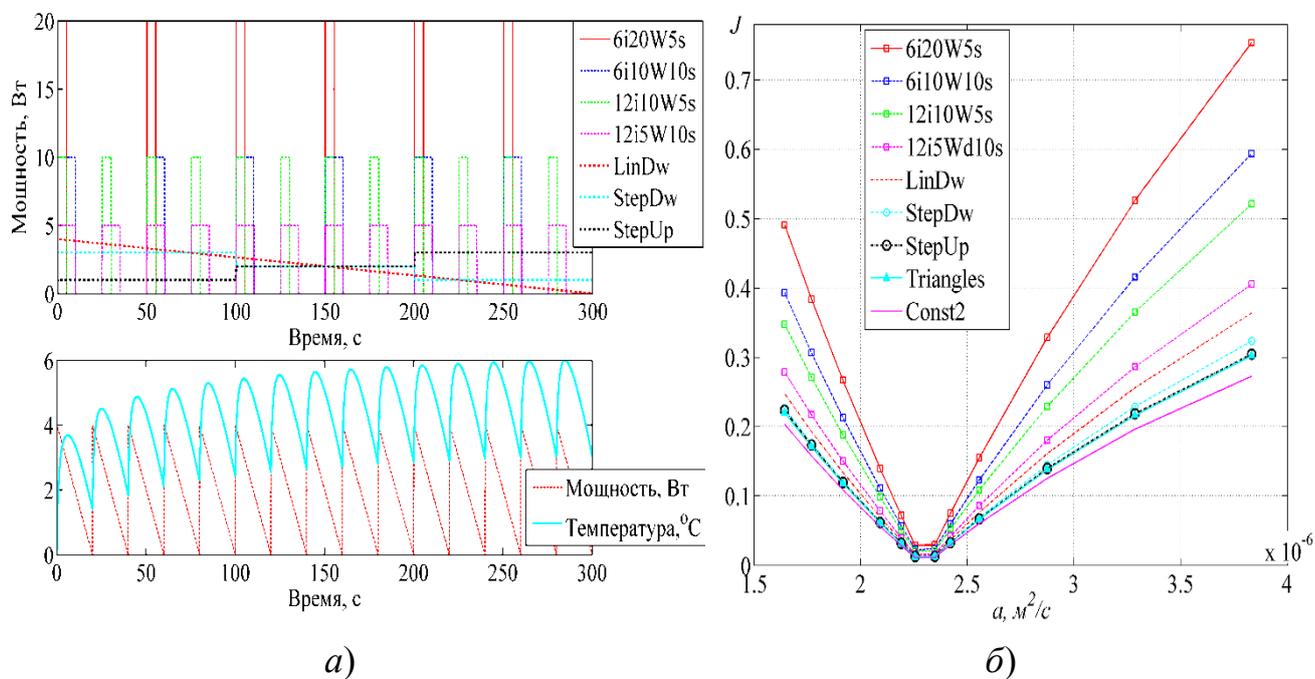


Рис. 1. На графиках слева (а) представлены тепловые сигналы разной формы, подаваемые на нагреватель цилиндрического зонда. На графике справа (б) – функционал невязки (3) от теплопроводности, для термограмм, соответствующих представленным на графике слева (а) тепловым сигналам

2) Определение тепловых свойств с применением теории разогрева однородного цилиндрического источника в однородной среде.

Высокая теплопроводность и низкая теплоемкость цилиндрического зонда относительно среды позволяют с помощью теории (1) определять тепловые свойства этой среды. Изготавливаемые нами зонды имеют теплопроводность ~ 16 Вт/м/К и теплоемкость ~ 200 Дж/кг/К, что позволяет с помощью теории (1) определять тепловые свойства сред с теплопроводностью не больше 1.2 Вт/м/К [Фадеева, 2016].

Чтобы определять тепловые свойства сред с большей теплопроводностью рассмотрена теория однородного цилиндрического источника с известными тепловыми свойствами. Решение задачи постоянного разогрева однородного бесконечно длинного цилиндра с теплофизическими параметрами (λ_3, a_3) в безграничной среде с параметрами (λ_{cp}, a_{cp}) было рассмотрено Карслоу [Карслоу,

Егер, 1964]. Изменение во времени распределения температуры в цилиндре выражается в следующем виде:

$$T_3(r, t) = \frac{4A_0\lambda_{cp}a_{cp}}{\pi^2 r_0} \int_0^\infty \frac{(1 - \exp(-a_3 u^2 t)) J_0(ur) J_1(ur_0) du}{u^4 [\varphi^2(u) + \psi^2(u)]} \quad (4)$$

где $\psi(u) = \lambda_3 \sqrt{a_{cp}} J_1(r_0 u) J_0(\sqrt{a_3/a_{cp}} r_0 u) - \lambda_{cp} \sqrt{a_3} J_0(r_0 u) J_1(\sqrt{a_3/a_{cp}} r_0 u)$,
 $\varphi(u) = \lambda_3 \sqrt{a_{cp}} J_1(r_0 u) Y_0(\sqrt{a_3/a_{cp}} r_0 u) - \lambda_{cp} \sqrt{a_3} J_0(r_0 u) Y_1(\sqrt{a_3/a_{cp}} r_0 u)$, A_0 [Вт/м³] - постоянное количество тепла выделяемого в единицу времени в единице объема цилиндра.

Для рассмотрения возможности одновременного определения параметров тепло- и температуропроводности исследуемой среды с помощью теории (4) и измерительного цилиндрического зонда с известными тепловыми свойствами строился функционал невязки между термограммой, рассчитанной численно и термограммами, рассчитанными по формуле (4):

$$J(\lambda, a) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k^N |T(\lambda, a, t_k) - T^m(t_k)|^2}, \quad (5)$$

где t_k - k -ый момент времени, $T^m(t)$ - численная термограмма зонда, расположенного в упоминаемой ранее среде m ; $T(\lambda, a, t)$ - термограмма рассчитанная по формуле (4) для зонда расположенного в средах с варьируемыми параметрами λ и a .

На рис. 2 представлен 3-х мерный функционал невязки, который имеет овражную структуру, что затрудняет определение его минимума. Если рассмотреть проекции этого функционала на плоскости (J, a) и (J, λ) для разных значений λ и a соответственно (см. легенду, рис. 2), то видно, что он имеет единственный минимум который соответствует тепловым свойствам модельной среды m .

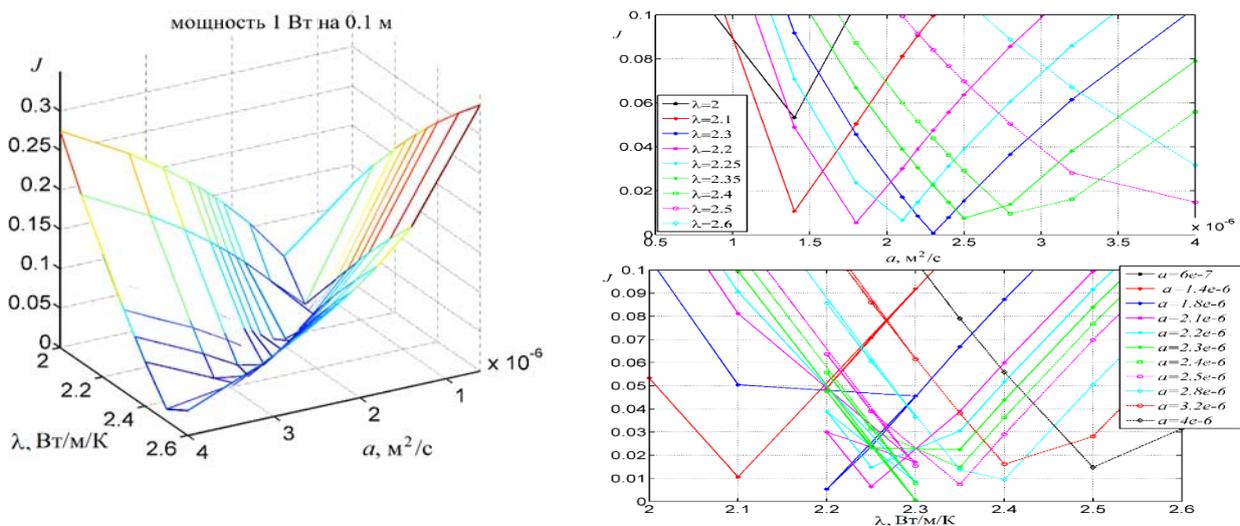


Рис. 2. Слева – функционал (5) на интервале варьируемых параметров λ и a .
 Справа – проекции функционала на плоскости: (a, J) и (λ, J)

3) Определение теплофизических параметров среды по термограмме пилообразного теплового импульса.

При моделировании разогрева среды игольчатым зондом с подаваемым на его нагреватель пилообразным треугольным импульсом (с линейно уменьшающейся до 0 мощностью), получается термограмма с явно выраженным максимумом, у которого есть два параметра: амплитуда и время его наступления. Было замечено, что эти два параметра в средах с разными тепловыми свойствами различаются. Из диаграммы максимумов (см. рис. 3) видно, что эти два параметра однозначно определяют тепловые свойства среды. На рис. 3, в координатах времени и температуры, кружками отмечены максимумы термограмм, полученных для сред с одинаковой плотностью (1000 кг/м^3) и разными теплопроводностью (1.4, 1.7, 2.0, 2.3 Вт/м/К) и теплоемкостью (600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 Дж/кг/К). Желтым кружкам, выстраивающимся в прямую линию, на рис. 3 соответствуют максимумы термограмм треугольного импульса для сред с теплопроводностью 2.3 Вт/м/К и разными теплоемкостями. Черные, оранжевые и синие кружки образуют похожие линии (изолинии теплопроводности) для $\lambda=2.0 \text{ Вт/м/К}$, $\lambda=1.7 \text{ Вт/м/К}$ и $\lambda=1.4 \text{ Вт/м/К}$, соответственно. Изолинии для сред с одинаковой теплоемкостью имеют экспоненциальный вид.

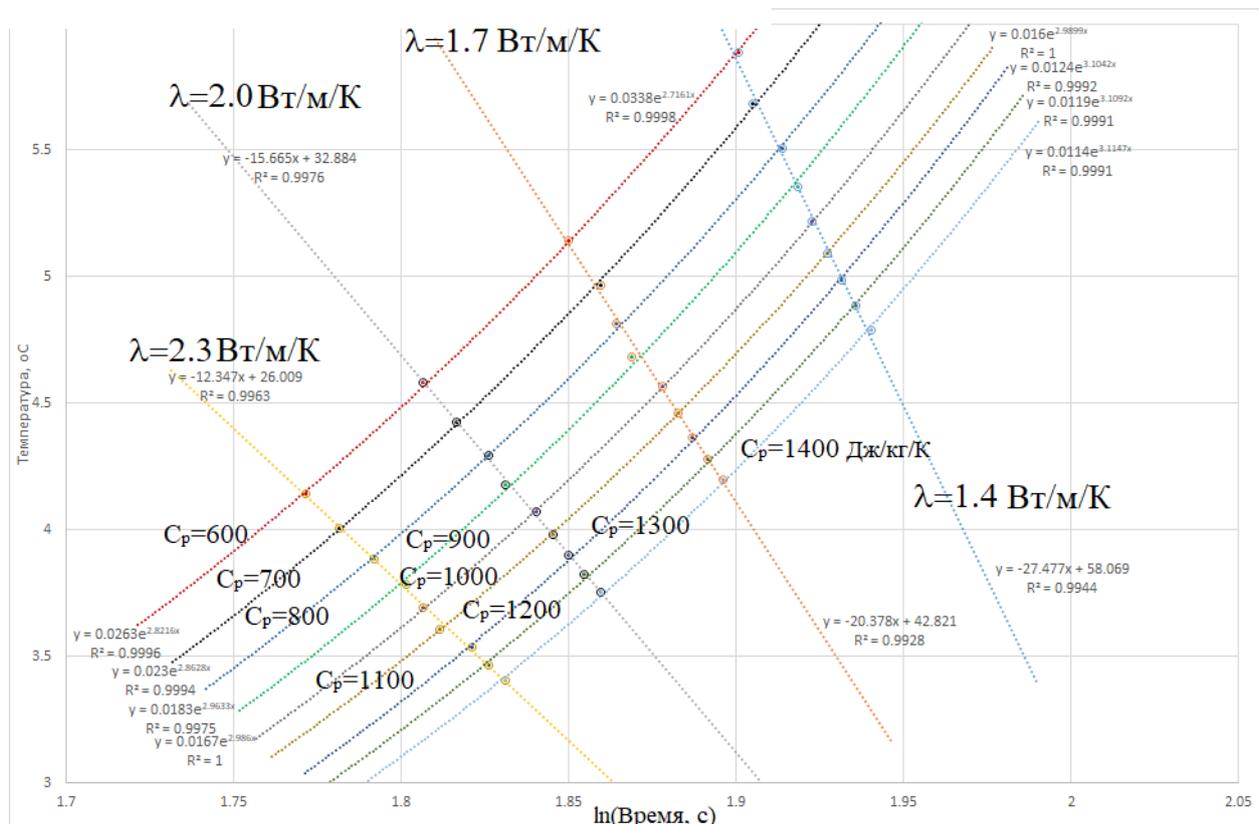


Рис. 3. Диаграмма максимумов термограмм пилообразного треугольного импульса, подаваемого на зонд, расположенный в средах с одинаковой ρ и разными λ и C_p .

Таким образом, при использовании пилообразного импульса, подаваемого на нагреватель одно-игольчатого зонда, время наступления максимума температуры и его значение (при известных плотности среды и тепловых свойствах зонда) взаимно-однозначно определяются теплопроводностью и теплоемкостью среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ASTM D 5334-00, Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity by Thermal Needle Probe Procedure. - 2000.
2. Bristow K.L., Kluitenberg G.J., Horton R. Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-Probe Heat-Pulse Technique // Soil Science Society of America Journal. January. – 1994. – № 58 (5).
3. Campbell, G. S., C. Calissendorff, and J. H. Williams, Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method // Soil Science Society of America Journal, 1991. – № 55(1). – P. 291–293.
4. De Vries, D. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ // Soil Science, 1952. – Vol. 73. – P. 83–89.
5. Kluitenberg, G.J., Ham J. M., Bristow K.L. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity // Soil Science Society of America Journal, 1993. – № 57(6). – P. 1444–1451.
6. R. Fon Herzen, and A.E. Maxwell A.E. Journal of Geophysical Research. – 1959. – Vol. 1. – № 10. – P. 1557–1563.
7. Карслоу У., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
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.

© И. И. Фадеева, Д. Е. Аюнов, А. А. Дучков, 2019