

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.362

**БЕСКОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПОЛНОРАЗМЕРНОГО КЕРНА
БЕЗ ВЫРАВНИВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ**

Е.Ю. ПОПОВ

*Сколковский институт науки и технологий
143026, Россия, Москва, ул. Нобеля, дом 3, e-mail: E.Popov@skoltech.ru*

Рассмотрен подход к измерениям тепловых свойств образцов горных пород, осуществляемый при помощи метода оптического сканирования, обеспечивающий массовые прецизионные неразрушающие измерения на полноразмерном и стандартном керне без нанесения специального покрытия на поверхность образцов, выравнивающего их оптические характеристики. Это до последнего времени являлось обязательным и вместе с тем затрудняло подготовку образцов и могло приводить к трудноустраняемым изменениям свойств образцов. Показано, что отсутствие покрытия не снижает качества измерений теплопроводности. Описывается способ учёта вариаций оптических характеристик изучаемых образцов пород для обеспечения измерений теплопроводности без нанесения покрытия, реализованный при непрерывном профилировании тепловых свойств на полноразмерном керне.

Ключевые слова: бесконтактные измерения; тепловые свойства горных пород; метод оптического сканирования; теплопроводность; температуропроводность; массовые измерения на керне; специальное оптическое покрытие; оптические характеристики образцов.

**CONTACTLESS MEASUREMENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY
AND THERMAL DIFFUSIVITY OF FULL-SIZE CORE SAMPLES WITHOUT
SAMPLES OPTICAL CHARACTERISTICS ALIGNMENT**

E.YU. POPOV

*Skolkovo Institute of Science and Technology
143026, Russia, Moscow, Nobel street, 3, e-mail: E.Popov@skoltech.ru*

A new approach to the rock thermal property measurements with optical scanning method is presented in the article. The approach provides the numerous high precision non-destructive measurements on full size core samples and core plugs without special aligning optical coating on surface of the rock samples. Recently the coating was the obligatory requirement of the sample preparation and made this procedure sophisticated. The previous procedure could result in intractable alterations of the rock properties also. It is shown that the thermal diffusivity measurement quality does not suffer without special optical coating. The technique of rock thermal conductivity measurements is described which takes into account the various optical parameters of the investigated rock samples. The technique was realized for continuous profiling the rock thermal properties on full size cores without the special optical coating.

Key words: rock thermal properties; optical scanning method; thermal conductivity; thermal diffusivity; numerous measurements on cores; special optical coating; optical characteristics of samples.

Роль тепловой петрофизики в нефтегазовой науке и технике в последнее десятилетие существенно возросла. Это связано с тем, что надёжные экспериментальные данные о тепловых свойствах пород — теплопроводности, температуропроводности, объёмной теплоёмкости — необходимы для таких современных видов работ, как проектирование методов добычи высоковязких нефтей с разогревом пласта, моделирование осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем, изучение баженовской свиты, расширение круга информативных параметров при изучении геологического строения месторождений углеводородов.

Развитие тепловой петрофизики в последние годы тесно связано с внедрением метода оптического сканирования [2, 3]. При измерениях тепловых свойств образцов горных пород этим методом при помощи оптического источника тепла (лазер, специальная лампа) осуществляют последовательный нагрев одного или нескольких помещённых в ряд образцов исследуемых пород и двух образцовых мер теплопроводности и температуропроводности (эталонных образцов) с известными теплопроводностью и температуропроводностью (рисунок). В процессе нагрева при помощи подвижных инфракрасных радиометров регистрируют электрические сигналы инфракрасных датчиков температуры, соответствующие температурам нагреваемых поверхностей исследуемых образцов пород и двух эталонных образцов как до нагрева, так и после него.

По результатам регистрации разностей электрических сигналов, соответствующих избыточным температурам нагреваемых поверхностей образцов пород и эталонных образцов, и по известным значениям теплопроводности и температуропроводности эталонных образцов определяют теплопроводность и температуропроводность каждого об-

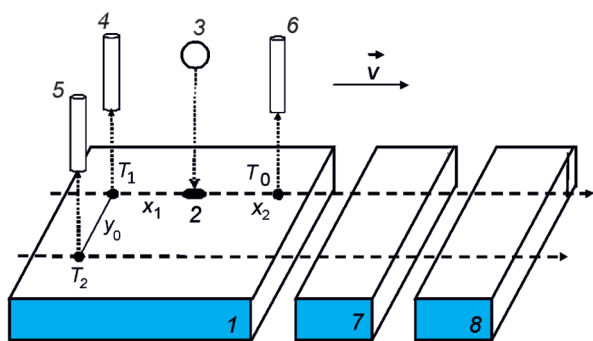


Схема расположения оптического источника тепла и инфракрасных датчиков температуры относительно исследуемого образца горной породы: 1 — исследуемый образец, 2 — пятно нагрева, 3 — оптический источник тепла, 4, 5, 6 — инфракрасные датчики температуры, 7, 8 — образцовые меры теплопроводности и температуропроводности (эталонные образцы), v — скорость движения оптического источника тепла и инфракрасных датчиков температуры относительно исследуемого образца и образцовых мер теплопроводности и температуропроводности

разца породы. Теплопроводность исследуемых образцов определяют при помощи соотношения [4]:

$$\frac{R_1}{2} \frac{U_{1R1}}{U_1} \frac{R_2}{U_{1R2}}, \quad (1)$$

где U — теплопроводность исследуемого образца породы, R_1 и R_2 — теплопроводность соответственно эталонных образцов 7 и 8, U_1 — разность электрических сигналов, соответствующих разности температур T_1 и T_0 на поверхности образца 1 и поверхности других исследуемых образцов пород и зарегистрированных соответственно датчиками температуры 4 и 6, U_{1R1} и U_{1R2} — разности электрических сигналов соответственно для эталонных образцов 7 и 8, при этом U_{1R1} соответствует разности температур T_{1R1} и T_{1R0} , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 4 и 6 на поверхности эталонного образца 7, а U_{1R2} соответствует разности температур T_{2R1} и T_{2R0} , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 4 и 6 на поверхности эталонного образца 8. Индексами R_1 и R_2 обозначаются параметры относящиеся к эталонным образцам 7 и 8.

Температуропроводность исследуемых образцов пород определяют при помощи соотношения [4]:

$$a \frac{a_{R1} \ln \frac{R_1}{R_2} \frac{U_{2R1}}{U_{2R2}}}{\ln \frac{R_1}{R_2} \frac{U_{2R1}}{U_{2R2}} \frac{a_{R2}}{a_{R1}} \ln \frac{U_2}{U_{2R1}}}, \quad (2)$$

где a — температуропроводность исследуемого образца 1 (или других исследуемых образцов пород), a_{R1} и a_{R2} — температуропроводность соответственно эталонных образцов 7 и 8, U_2 — разность электрических сигналов, соответствующих разности температур T_2 и T_0 на поверхности образца 1 и поверхности других образцов исследуемых пород и зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6, U_{2R1} и U_{2R2} — разности электрических сигналов соответственно для эталонных образцов 7 и 8, зарегистрированных датчиками температуры 5 и 6, при этом U_{2R1} соответствует разности температур T_{2R1} и T_{1R0} , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6 на поверхности эталонного образца 7, а U_{2R2} соответствует разности температур T_{2R1} и T_{2R0} , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6 на поверхности эталонного образца 8.

При измерениях с использованием формул (1) и (2) предполагается, что все приводимые в этих формулах разности электрических сигналов U в одинаковой степени пропорциональны указанным выше разностям температур T , т. е. для всех разностей сигналов и температур строго выполняется условие:

$$U = c T, \quad (3)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

В рамках существовавшей до последнего времени практики, чтобы обеспечить одинаковую полезную мощность в пятне нагрева для всех образцов и одинаковую зависимость электрических сигналов инфракрасных датчиков температуры от коэффициента излучения поверхностей всех исследуемых и эталонных образцов, перед измерениями рабочие поверхности всех образцов пород и эталонных образцов обрабатывают так, чтобы обеспечить одинаковые коэффициенты поглощения и одинаковые коэффициенты излучения нагреваемых поверхностей образца породы и эталонных образцов. Для этого нагреваемые поверхности образца и эталонных образцов покрывают слоем одного и того же вещества, например, краски или тонкой клейкой пленки. Для осадочных пород достаточно часто это является недостатком данного метода измерений, так как приводит к потерям рабочего времени на нанесение покрытия и удаление его после завершения измерений. Кроме того, в случае использовании специального красящего вещества может происходить проникновение краски в поры и трещины образцов высокопористых и трещиноватых осадочных пород, что, возможно, приведет к изменению свойств образцов.

При нагреве образца подвижным пятном нагрева и регистрации избыточной температуры нагрева подвижными датчиками температуры избыточная температура нагрева T_1 образца твёрдого тела в области регистрации её датчиком температуры 4 определяется соотношением [4]:

$$T_1 = \frac{q}{2 x_1}, \quad (4)$$

где q — мощность локального источника тепла в пятне нагрева, а избыточная температура нагрева

T_2 образца твёрдого тела в области регистрации её датчиком 5 температуры теоретически определяется соотношением [4]:

$$T_2 = \frac{q}{2 L} \exp \frac{\nu(x_1 - L)}{2a}, \quad (5)$$

где $L = ((x_1)^2 + (y_0)^2)^{1/2}$ — расстояние от источника нагрева до области регистрации её датчиком 5 (рисунк), x_1 — расстояние от источника нагрева до области регистрации температуры по оси движения источника нагрева (рисунк), ν — скорость движения пятна нагрева и участка регистрации температуры датчиком 5 температуры относительно нагреваемого образца породы.

При нагреве поверхности образца породы оптическим источником, когда от источника на поверхность образца попадает излучение мощностью q , эффективная, т. е. поглощаемая образцом породы,

мощность нагрева составляет q , где — коэффициент поглощения излучения поверхностью образца породы. Поэтому реальная избыточная температура нагрева поверхности образца породы (T_1)_p на участке её регистрации датчиком 4 температуры составит:

$$(T_1)_p = \frac{q}{2 x_1}, \quad (6)$$

реальная избыточная температура нагрева поверхности образца породы (T_2)_p на участке её регистрации датчиком 5 температуры будет:

$$(T_2)_p = \frac{q}{2 L} \exp \frac{\nu(x_1 - L)}{2a}. \quad (7)$$

В общем случае разность U между электрическим сигналом U_6 инфракрасного радиометра 6 для ненагретой поверхности образцов с температурой T_0 и электрическим сигналом U_4 инфракрасного радиометра 4 или электрическим сигналом U_5 инфракрасного радиометра 5 для нагретой поверхности образцов с температурой T (где T равно T_1 для радиометра 4 и T_2 для радиометра 5) можно представить, как в [1]:

$$U = r - r_0 = (r - r_0) = r, \quad (8)$$

где — коэффициент преобразования инфракрасного радиометра, который должен быть одинаковым для всех используемых радиометров, для чего необходимо использовать однотипные инфракрасные радиометры 4, 5 и 6, r — энергетическая светимость нагретой поверхности образца породы или эталонного образца, r_0 — энергетическая светимость ненагретой поверхности образца породы или эталонного образца, $r = r - r_0$.

Согласно закону Стефана-Больцмана, энергетическую светимость можно выразить через температуру поверхности исследуемого образца породы или эталонного образца:

$$r = T^4, \quad (9)$$

где — коэффициент излучения нагреваемой поверхности образца, — постоянная Стефана-Больцмана, T — абсолютная температура поверхности образца породы или эталонного образца.

Согласно (8) и (9), разность электрических сигналов U можно представить следующим образом:

$$U = (r - r_0) = (T^4 - T_0^4). \quad (10)$$

Известно, что для любой функции $F = F(z)$ её приращение F при малых изменениях аргумента z можно выразить, как

$$F \approx \frac{dF}{dz} z, \quad (11)$$

где $\frac{dF}{dz}$ — первая производная функции F по z .

Уровни избыточных температур T_i являются существенно меньшими, чем абсолютная температура T поверхностей образцов, которую, согласно методике измерений, обеспечивают близкой для всех нагреваемых образцов, не отличающейся более чем на 3 К, т. е. на 1 % от уровня T , даже при массовых измерениях в условиях керноскладов. Любую разность сигналов U , т. е. разности электрических сигналов U_1 , U_{1R1} и U_{1R2} инфракрасных датчиков температуры 4 и 6, соответствующие избыточной температуре $(T_1)_p$ нагреваемого образца и избыточным температурам $(T_{1R1})_p$ и $(T_{1R2})_p$ эталонных образцов, а также разности электрических сигналов U_2 , U_{2R1} и U_{2R2} инфракрасных датчиков температуры 5 и 6, соответствующие избыточной температуре $(T_2)_p$ нагреваемого образца и избыточным температурам $(T_{2R1})_p$ и $(T_{2R2})_p$ эталонных образцов, исходя из закона Стефана-Больцмана и, согласно (11), можно представить в виде:

$$U = r \cdot 4 T^3 (T_p) - 4 T^3 T, \quad (12)$$

где r — коэффициент преобразования инфракрасного радиометра, r — энергетическая светимость поверхности образца, r — повышение энергетической светимости образца породы после его нагрева, ϵ — коэффициент поглощения нагреваемой поверхности образца, ϵ — коэффициент излучения нагреваемой поверхности образца, T — абсолютная температура нагреваемой поверхности образца, T — реальная избыточная температура T_1 или T_2 нагреваемой поверхности образца.

При использовании инфракрасных радиометров 4, 5 и 6, имеющих равные коэффициенты преобразования регистрируемой энергетической светимости в электрический сигнал, формулу (12) можно записать в виде

$$U = K T, \quad (13)$$

где $K = 4 T^3$.

Таким образом, при отсутствии специального одинакового покрытия поверхностей исследуемых образцов пород и эталонных образцов в исходных для расчетов тепловых свойств формулах (1) и (2) вместо разницы сигналов U , строго пропорциональной разности температур, согласно (3), будет входить реальная разность сигналов U . Эта реальная разность сигналов U , согласно (3) и (13), связана с U соотношением

$$U = \frac{K}{c} U \quad (14)$$

и, согласно (13), зависит не только от разности температур T , но и от параметра c , т. е. от оптических характеристик поверхности. В таком случае формальная подстановка U в уравнения (1) и (2) вместо U может приводить к серьезным погрешностям измерений теплопроводности и температуропроводности, что требует анализа такого влияния на качество измерений и методических мер по устранению этого влияния.

При отсутствии специального покрытия, нанесенного перед началом измерений на образцы пород и эталонные образцы с известными теплопроводностью и температуропроводностью, теплопроводность каждого j -го образца породы из N_0 образцов исследуемых пород, изучаемых при одном процессе сканирования ($1 \leq j \leq N_0$), можно определить из формулы, следующей из формул (1) и (13):

$$U_{1j} = \frac{U_{1R1} \frac{\epsilon_j}{\epsilon_{R1}} - U_{1R2} \frac{\epsilon_j}{\epsilon_{R2}}}{2 \epsilon_j}, \quad (15)$$

где U_{1j} — разность электрических сигналов датчиков 4 и 6 для j -го исследуемого образца, а температуропроводность каждого j -го образца породы из N_0 исследуемых образцов можно определить из формулы, следующей из формул (2) и (13):

$$a_j = \frac{a_{R1} \ln \frac{\epsilon_{R1} U_{2R1} - \epsilon_{R2} U_{2R2}}{\epsilon_{R1} U_{2R1} - \epsilon_{R2} U_{2R2}}}{\ln \frac{\epsilon_{R1} U_{2R1} - \epsilon_{R2} U_{2R2}}{\epsilon_{R1} U_{2R1} - \epsilon_{R2} U_{2R2}} - \frac{a_{R2} a_{R1}}{a_{R2}} \ln \left(\frac{\epsilon_{R1} U_{1R1} - \epsilon_{R2} U_{1R2}}{\epsilon_{R1} U_{1j} - \epsilon_{R2} U_{2R1}} \right) \frac{U_{2j}}{\epsilon_{R2}}}, \quad (16)$$

где U_{2j} — разность электрических сигналов датчиков 5 и 6 для j -го исследуемого образца, индекс “ j ” при коэффициентах поглощения и излучения со-

ответствует характеристикам образцов пород, а индексы R_1 и R_2 при коэффициентах поглощения и излучения относятся к эталонным образцам 7 и 8.

При использовании N эталонных образцов ($N \geq 2$), размещаемых последовательно с исследуемыми образцами пород, формула (15) приобретает вид:

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \lambda_{Ri} \cdot \Delta' U_{1Ri} \cdot \frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_{Ri} \rho_{Ri}}}{N \cdot \Delta' U_{1j}}, \quad (17)$$

а формула (16) —

$$a_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{m,k=1}^{m,k=N} \frac{a_{Rm} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{2Rm} \cdot \varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta' U_{2Rk} \cdot \varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}} \right)}{\ln \left(\frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{2Rm} \cdot \varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta' U_{2Rk} \cdot \varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}} \right) + \frac{a_{Rk} - a_{Rm}}{a_{Rk}} \cdot \ln \left(\frac{(\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{1Rm} + \lambda_{Rk} \cdot \Delta' U_{1Rk}) \cdot \Delta' U_{2j}}{\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{1j} \cdot \Delta' U_{2Rm} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}}{\varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}} \right)} \right)}, \quad (18)$$

где i, m и k — переменные суммирования (при $1 \leq m, k \leq N, m \neq k$), n — число размещений из N по 2.

Непосредственное определение отношения $(\varepsilon_{Rk} \rho_{Rk})/(\varepsilon_{Rm} \rho_{Rm})$, входящего в формулу (18) и необходимого для определения температуропроводности образцов пород, предлагается осуществлять путем нагрева эталонных образцов и регистрации при помощи датчиков 4 и 6 электрических сигналов $\Delta' U_{1Rk}$ и $\Delta' U_{1Rm}$. Из формул (4) и (13) следует, что

$$\frac{\Delta' U_{1R1}}{\Delta' U_{1R2}} = \frac{(\varepsilon_{R1} \rho_{R1}) \cdot \lambda_{R2}}{(\varepsilon_{R2} \rho_{R2}) \cdot \lambda_{R1}}, \quad (19)$$

откуда получаем соотношение для оценки отношения $(\varepsilon_{Rk} \rho_{Rk})/(\varepsilon_{Rm} \rho_{Rm})$ путём определения электрических сигналов $\Delta' U_{1Rk}$ и $\Delta' U_{1Rm}$ и по известным значениям теплопроводности λ_{Rk} и λ_{Rm} эталонных образцов:

$$\frac{\varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}}{\varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}} = \frac{\Delta' U_{1Rk} \cdot \lambda_{Rk}}{\Delta' U_{1Rm} \cdot \lambda_{Rm}}. \quad (20)$$

Технически несложно предварительно обработать поверхности каждого i -го эталонного образца

из N эталонных образцов так, чтобы обеспечить одинаковое произведение для всех эталонных образцов, т. е. обеспечить равенство

$$\varepsilon_{Ri} \rho_{Ri} = \varepsilon_{R} \rho_{R}. \quad (21)$$

Выполнение условия $\varepsilon_{Ri} \rho_{Ri} = \varepsilon_{R} \rho_{R}$ для поверхностей эталонных образцов осуществляют, нанося на них тонкий слой непрозрачного однородного вещества (краска, тонкая клейкая лента), что приводит к равенству коэффициентов поглощения и излучения эталонных образцов. В таком случае теплопроводность каждого j -го исследуемого образца после завершения нагрева исследуемых образцов и эталонных образцов можно определять согласно соотношения, следующему из соотношения (17) при выполнении условия (21):

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_{Ri} \cdot \Delta' U_{1Ri}}{N \cdot \Delta' U_{1j}} \cdot \frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_{R} \rho_{R}}. \quad (22)$$

Температуропроводность каждого j -го исследуемого образца породы можно определять из соотношения, следующего из соотношения (18) при выполнении условия (21):

$$a_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{m,k=1}^{m,k=N} \frac{a_{Rm} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{2Rm}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta' U_{2Rk}} \right)}{\ln \left(\frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{2Rm}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta' U_{2Rk}} \right) + \frac{a_{Rk} - a_{Rm}}{a_{Rk}} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_j \cdot \Delta' U_{2j}}{\lambda_{Rm} \cdot \Delta' U_{2Rk}} \right)}. \quad (23)$$

Из (23) следует важный вывод о том, что отсутствие специального выравнивающего покрытия на образцах пород (непрозрачных для излучения источника тепла) не вносит дополнительной систематической погрешности в измерения температуропроводности, т. е. не влияет на качество измерений этой характеристики.

Согласно (22), отсутствие покрытия вносит систематическую (неконтролируемую) погрешность в измерения теплопроводности, причем, как это следует из (22), на практике эта погрешность может

достигать десятков процентов при значительных различиях в $\varepsilon_j \rho_j$ и $\varepsilon_{R} \rho_{R}$. Например, при $\varepsilon_j = \rho_j = 0,8$ и при $\varepsilon_{R} = \rho_{R} = 0,95$, т. е. даже при не столь значительном различии оптических характеристик эталонных образцов и исследуемого образца, согласно (22), погрешность составит 41 %, что на практике недопустимо. Чтобы избежать систематических погрешностей при измерениях теплопроводности в случае отсутствия покрытия на образцах пород, следует предварительно разделять исследуемые образцы на группы, каждая из которых включает в

себя исследуемые образцы с одинаковыми (близкими) коэффициентами поглощения и одинаковыми (близкими) коэффициентами излучения, что обеспечивает стабильность произведения j_j для образцов каждой группы. Затем из каждой группы отбирают по одному образцу породы и для каждого отобранного образца измеряют теплопроводность методом оптического сканирования с использованием формулы (17). Измеренное таким образом значение теплопроводности будет искаженным и составит отличное от действительного значение ошиб из-за неопределённости коэффициентов поглощения и излучения отобранных образцов пород без покрытия. При использовании N эталонных образцов и использовании каждого из них для определения теплопроводности отобранного исследуемого образца породы значение ошиб согласно (17), определяется, как

$$\text{ошиб} = \frac{N}{i-1} \frac{R_i U_{1Ri}}{U_1}. \quad (24)$$

Ошибка в измерении теплопроводности для отобранного образца без покрытия обусловлена тем, что формулы (17) и (24) справедливы лишь при условии $j_j = R R$, т. е. когда поверхности исследуемых образцов пород имеют такое же произведение коэффициентов поглощения и излучения, что и эталонные образцы. В данном же случае отношение $\frac{j_j}{R R}$ является неизвестным, что и приводит к ошибке измерений. С действительным значением теплопроводности отобранного образца измеренное значение ошиб связано соотношением, следующим из (17) и (24):

$$\text{ошиб} = \frac{j_j}{R R}. \quad (25)$$

После измерений ошиб предлагается обработать поверхность каждого отобранного исследуемого образца или ее часть этой поверхности вдоль линии нагрева так, чтобы обеспечить одинаковое произведение коэффициента поглощения и коэффициента излучения обработанных поверхностей отобранных исследуемых образцов и эталонных образцов. Это можно сделать, например, покрыв поверхность каждого отобранного образца или часть этой поверхности вдоль линии нагрева слоем той же краски или той же клейкой ленты, которые использовались для покрытия поверхности эталонных образцов. После этого вновь при помощи формулы (24), теперь уже корректной для данного случая, поскольку обеспечено соблюдение условия $j_j = R R$, определяют теплопроводность путём нагрева обработанных участков поверхностей ото-

бранных исследуемых образцов пород и регистрации на них избыточных температур нагрева. Далее по результатам двух измерений теплопроводности отобранных исследуемых образцов — сначала на необработанных, а потом на обработанных участках поверхности — из соотношения (25) определяют для каждого отобранного исследуемого образца отношение $\frac{j_j}{R R}$ произведения коэффициента поглощения и коэффициента излучения каждого отобранного исследуемого образца к произведению коэффициента поглощения и коэффициента излучения эталонных образцов:

$$\frac{j_j}{R R} = \frac{\text{ошиб}}{\text{ошиб}}. \quad (26)$$

Затем при помощи метода оптического сканирования проводят измерения теплопроводности и температуропроводности остальных образцов из той серии, к которой относился отобранный образец, при этом на поверхность каждого образца из данной серии не наносят никакого покрытие. Поскольку соотношение (26) является общим для всех образцов данной серии и, следовательно, отношение $\frac{j_j}{R R}$ является известным для всех образцов данной серии, определение теплопроводности каждого исследуемого образца из данной серии осуществляют при помощи формулы (22), а определение температуропроводности каждого исследуемого образца из данной серии — при помощи формулы (23). Точно так же при помощи известного способа проводят измерения теплопроводности и температуропроводности всех образцов из других серий, используя для образцов каждой серии значения отношения $\frac{j_j}{R R}$, установленные предварительно для отобранных образцов из каждой серии так, как это рекомендуется выше.

Для повышения точности определения отношения $\frac{j_j}{R R}$ для каждого отобранного образца из каждой серии поверхность каждого отобранного образца можно разделить на две части вдоль линии нагрева. Первую часть поверхности после первых измерений на ней теплопроводности (ошиб)₁ покрывают перед вторым измерением теплопроводности слоем той же краски или той же клейкой ленты, которые использовались для покрытия поверхности эталонных образцов с известными теплопроводностью и температуропроводностью, для обеспечения условия $j_j = R R$. Вторую часть поверхности после первых измерений на ней теплопроводности (ошиб-1)₂ оставляют без какой-либо обработки поверхности. После нанесения покры-

тия на первую часть поверхности каждого отобранного образца вдоль линии нагрева определяют действительную теплопроводность на первой части отобранного образца и дополнительно вновь определяют теплопроводность $(\text{ошиб-2})_2$ на необработанных участках поверхностей для каждого отобранного исследуемого образца. После этого для каждого отобранного образца определяют отношение $(\text{ошиб-1})_2 / (\text{ошиб-2})_2$ значений теплопроводности $(\text{ошиб-1})_2$ и $(\text{ошиб-2})_2$, полученных для второй части отобранного образца при измерениях до и после обработки поверхности первой части поверхности. Согласно формуле (17), разности выходных сигналов U_1 датчиков 4 и 6 температуры, регистрирующих температуру на необработанных участках каждого отобранного исследуемого образца, определяют измеряемое значение теплопроводности исследуемого образца. В случае, если мощность источника q стабильна и одинакова при нагреве как исследуемых образцов пород, так и эталонных образцов, величина мощности источника нагрева, согласно формулам (4), (5), (13), (17) и (18), не влияет на точность измерений теплопроводности и температуропроводности. Если же происходит случайное изменение мощности между первым измерением теплопроводности на отобранном образце без покрытия и вторым измерением теплопроводности на отобранном образце с покрытием второй части, а для эталонных образцов мощность источника нагрева при обоих измерениях теплопроводности на отобранном образце остается постоянной, то, согласно (4), (13) и (24), это приводит к погрешности измерений теплопроводности l и следовательно, по формуле (26), — к погрешности определения необходимого отношения $\frac{j}{R} \frac{j}{R}$. Согласно соотношению (17), эта погрешность определения отношения $\frac{j}{R} \frac{j}{R}$ внесёт погрешность в результаты измерений теплопроводности на всех остальных образцах данной серии. Для исключения погрешности в определении отношения $\frac{j}{R} \frac{j}{R}$ можно осуществлять выявление и исключение таких изменений мощности источника нагрева. С этой целью необходимо сравнение избыточного сигнала $(U_1)_1$ при первом измерении теплопроводности $(\text{ошиб-2})_1$ на той второй части поверхности отобранного образца, которая не будет подвергаться обработке перед вторым измерением после покрытия второй части поверхности отобранного образца, с избыточным сигналом $(U_1)_2$ при втором измерении теплопроводности на этой второй части поверхности отобранного образца, при котором результат измерений составит $(\text{ошиб-2})_2$. Согласно формулам (4), (13) и (17), относительное из-

менение избыточного сигнала $\frac{(U_1)_1}{(U_1)_2}$ определяется соотношением

$$\frac{(U_1)_1}{(U_1)_2} = \frac{(\text{ошиб } 2)_1}{(\text{ошиб } 2)_2}. \quad (27)$$

Соотношение (27) позволяет определить соответствующую относительную погрешность измерений теплопроводности на первой части поверхности отобранного образца и, следовательно, согласно (17), обеспечивает определение и учёт погрешности отношения $\frac{j}{R} \frac{j}{R}$. В свою очередь, это позволяет исключить обусловленную этим относительную погрешность измерений теплопроводности всех образцов данной серии.

Согласно метрологическим исследованиям, проведённым на одних и тех же образцах пород при нанесении на их поверхность специального покрытия и без него, описанный способ измерений тепловых свойств образцов горных пород без их покрытия вносит дополнительную погрешность при измерениях теплопроводности не более 3 %, что вполне допустимо при массовых измерениях на полноразмерном керне с целью регистрации вариаций тепловых свойств вдоль скважины. Результаты этих исследований показали, что качество измерений температуропроводности на полноразмерном керне (в случае непрозрачности пород в диапазоне излучения оптического источника и инфракрасных радиометров) без покрытия поверхности керна практически не изменяется.

Описанный в данной работе способ измерений успешно применен при проведении теплового петрокаротажа с непрерывным профилированием тепловых свойств на 1124 полноразмерных дубликатах полноразмерного керна («горбушках») для четырёх скважин, пробуренных в толще аргиллитов.

Выводы

1. Исключение покрытия образцов пород специальным красящим веществом или тонкой пленкой, применявшегося ранее для выравнивания оптических характеристик поверхности образцов перед проведением измерений их тепловых свойств методом оптического сканирования, не снижает качество измерений температуропроводности пород.
2. Предложенный способ измерений теплопроводности методом оптического сканирования без покрытия поверхности образцов пород специальным красящим веществом или тонкой пленкой вносит дополнительную погрешность при измерениях теплопроводности не более 3 %, что вполне

допустимо при массовых измерениях на полноразмерном керне с целью регистрации вариаций тепловых свойств вдоль скважины.

3. Предлагаемые усовершенствования метода оптического сканирования открывают возможность для внедрения метода теплового петрокаротажа, обеспечивающего непрерывное бесконтакт-

ное профилирование комплекса тепловых свойств на керне без изменения его состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках работ по проекту №14.581.21.0008 от 03.10.2014 г (уникальный идентификатор RFMEFI58114X0008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е.Ю., Попов Ю.А., Паршин А.В. Способ бесконтактного определения теплопроводности и температуропроводности материалов. Патент RU 134146, приоритет 2013, дата публикации февраль 2014.
2. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Паршин А.В., Попов Е.Ю., Миклашевский Д.Е. Новая аппаратно-методическая база тепловой петрофизики как средство повышения эффективности добычи тяжелых нефтей // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 4. С. 52–58.
3. Chekhonin E., Parshin A., Pissarenko D., Popov Y., Romushkevich R., Safonov S., Spasennykh M., Chertenkov M., Stenin V. When rocks get hot: Thermal properties of reservoir rocks. *Oilfield Review*. 2012, 24(3). P. 20–37.
4. Popov Yu., Parshin A., Chekhonin E.M., Popov E., Miklashevskiy D., Suarez-Rivera R., Green S. 2013. Continuous core thermal properties measurements and analysis. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013. ARMA 13-391. V. 4. P. 2991–2999.

