



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01N 15/088 (2025.01); G01N 15/082 (2025.01); G01N 2015/0833 (2025.01); G01N 25/18 (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2024139277, 24.12.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.12.2024

Дата регистрации:
11.06.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.12.2024

(45) Опубликовано: 11.06.2025 Бюл. № 17

Адрес для переписки:

121205, Москва, ул. Луговая, 4, корп. 2, Котлов
Дмитрий Владимирович

(72) Автор(ы):

Калинина Мария Сергеевна (RU),
Попов Юрий Анатольевич (RU),
Баяк Ирина Олеговна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего
образования "Сколковский институт науки
и технологий" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2492456 C1 10.09.2013. Попов
Е.Ю., Попов Ю.А. и др., "Измерения тепловых
свойств пород на стандартных образцах как
необходимый этап теплофизических
исследований месторождений углеводородов",
Известия Высших Учебных Заведений.
Геология и Разведка, 2017, номер 2, С.56-70.
Irina Bayuk, Gennady Goloshubin, Yuriy
Tsimbaluk and Fedor Borkun, (см. прод.)

(54) Способ определения главных значений тензора проницаемости образцов породы

(57) Реферат:

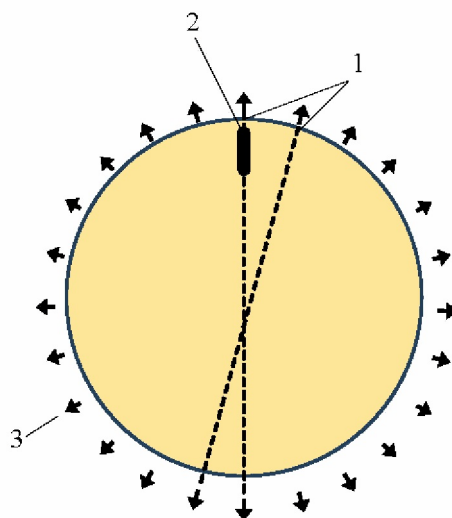
Изобретение относится к области определения физических свойств образцов пористых пород, обладающих анизотропией свойств, в частности к определению главных значений тензора проницаемости, главных значений тензора теплопроводности матрицы, открытой пористости и характеристик пустотного пространства. Предложен способ определения главных значений тензора проницаемости образца породы, который включает определение направления главных осей теплопроводности образца породы, поочередное насыщение образца породы двумя флюидами с разной теплопроводностью или двумя смесями флюидов, имеющими разную теплопроводность и полученными в результате смешивания по меньшей мере двух флюидов, каждый из которых имеет разную теплопроводность. При этом после

каждого насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы, далее дополнительно насыщают образец породы флюидом, имеющим теплопроводность, отличную от теплопроводности флюидов на предыдущем этапе насыщения, или смесью флюидов, имеющей теплопроводность, отличную от теплопроводности смеси флюидов на предыдущем этапе насыщения и состоящей по меньшей мере из двух флюидов. После дополнительного насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы, затем по результатам вышеуказанных измерений главных значений тензора теплопроводности образца определяют главные значения тензора теплопроводности матрицы, открытую

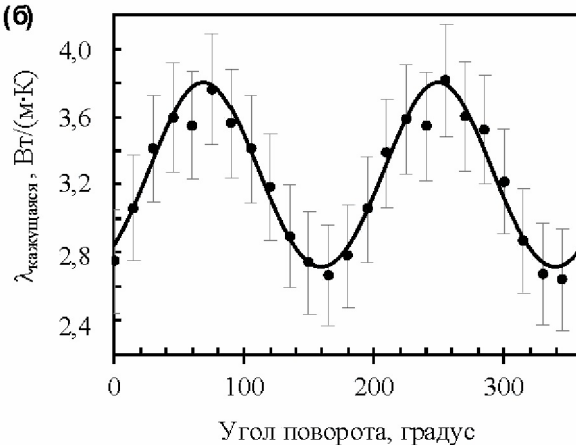
пористость и характеристики пустотного пространства, по значениям которых определяют искомые главные значения тензора проницаемости образца породы. Техническим результатом изобретения является обеспечение

возможности определения главных значений тензора проницаемости и главных значений тензора теплопроводности матрицы образца пористой породы. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.

(a)



(б)



Фиг. 1

(56) (продолжение):

"Rock-physics based prediction of hydraulic permeability and thermal conductivity of anisotropic clastic rocks from logging data", Сборник: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2016, pp.3154-3158. RU 2636821 C1, 28.11.2017. CN 118258980 A, 28.06.2024. CN 118225814 A, 21.06.2024. CN 111638167 A, 08.09.2020. US 9494537 B2, 15.11.2016. RU 2492447 C1, 10.09.2013.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

G01N 15/088 (2025.01); G01N 15/082 (2025.01); G01N 2015/0833 (2025.01); G01N 25/18 (2025.01)(21)(22) Application: **2024139277, 24.12.2024**(24) Effective date for property rights:
24.12.2024Registration date:
11.06.2025

Priority:

(22) Date of filing: **24.12.2024**(45) Date of publication: **11.06.2025** Bull. № 17

Mail address:

**121205, Moskva, ul. Lugovaya, 4, korp. 2, Kotlov
Dmitrij Vladimirovich**

(72) Inventor(s):

**Kalinina Mariya Sergeevna (RU),
Popov Yuriy Anatolevich (RU),
Bayuk Irina Olegovna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Avtonomnaya nekommercheskaya
obrazovatel'naya organizatsiya vysshego
obrazovaniya "Skolkovskij institut nauki i
tekhnologii" (RU)**(54) **ROCK SAMPLES PERMEABILITY TENSOR MAIN VALUES DETERMINING METHOD**

(57) Abstract:

FIELD: measuring.

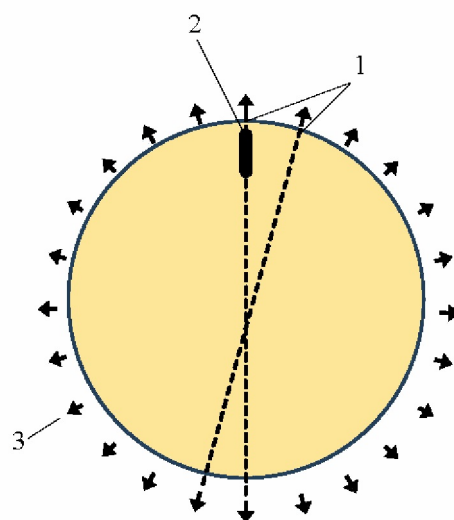
SUBSTANCE: invention relates to determination of physical properties of samples of porous rocks having anisotropy of properties, particularly to determination of main values of permeability tensor, main values of tensor of thermal conductivity of matrix, open porosity and characteristics of void space. Disclosed is the rock sample permeability tensor main values determining method, which includes determining the rock sample thermal conductivity main axes direction, alternating saturation of rock sample with two fluids with different thermal conductivity or two mixtures of fluids, having different thermal conductivity and obtained by mixing of at least two fluids, each of which has different thermal conductivity. After each saturation of the rock sample, determining the main values of the thermal conductivity tensor of the rock sample, further, rock sample is additionally saturated with fluid having thermal conductivity different from thermal conductivity

of fluids at previous stage of saturation, or a mixture of fluids having a thermal conductivity different from that of the mixture of fluids at the previous saturation step and consisting of at least two fluids. After rock sample additional saturation determining main values of rock sample thermal conductivity tensor, then, according to the results of said measurements of the main values of the thermal conductivity tensor of the sample, determining the main values of the thermal conductivity tensor of the matrix, the open porosity and characteristics of the void space, the values of which are used to determine the desired main values of the permeability tensor of the rock sample.

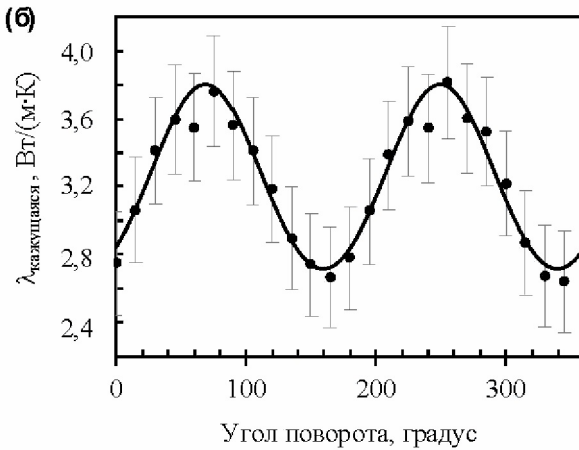
EFFECT: possibility of determining principal values of the permeability tensor and principal values of the thermal conductivity tensor of a matrix of a porous rock sample.

2 cl, 2 dwg

(a)



(б)



Фиг. 1

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Изобретение относится к области определения физических свойств образцов пористых пород, обладающих анизотропией свойств, в частности к определению главных значений тензора проницаемости, главных значений тензора теплопроводности матрицы, открытой пористости и характеристик пустотного пространства.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Из уровня техники известен способ определения физических свойств пород горного массива, включая проницаемость пород, который состоит из следующих операций: измерение скорости продольных упругих волн и удельного электрического

сопротивления пород горного массива, полученных в результате исследований в скважине, а также определение открытой пористости на образцах породы методом гидростатического взвешивания (Irina Bayuk, Gennady Goloshubin, Yuriy Tcimbalkin and Fedor Borkun (2016). Rock-physics based prediction of hydraulic permeability and thermal conductivity of anisotropic clastic rocks from logging data, doi: <https://doi.org/10.1190/seam2016-13762472.1>). По измеренным скоростям продольных упругих волн и удельному электрическому сопротивлению пород горного массива определяют характеристики пустотного пространства, минимизируя расхождения между теоретическими и измеренными значениями этих физических свойств горного массива. В качестве характеристик пустотного пространства используют форму пор и трещин, которые моделируют эллипсоидами вращения и описывают одним аспектным отношением, а также параметр связанности пустотного пространства. Теоретические значения скорости продольных упругих волн и удельного электрического сопротивления горного массива определяют с использованием метода обобщенного сингулярного приближения в модификации f-модель теории эффективных сред, который устанавливает зависимость значения измеренного физического свойства горного массива от физических свойств матрицы, свойств флюида, заполняющего пустотное пространство породы, открытой пористости и характеристик пустотного пространства породы. Измеренные скорости продольных упругих волн и удельное электрическое сопротивление пород горного массива, полученные в результате исследований в скважине, а также открытая пористость, определенная на образцах пород, и ранее определенные характеристики пустотного пространства используют для оценки проницаемости горного массива с применением методов теории эффективных сред. Значение проницаемости пористых пород горного массива определяют в зависимости от матричной проницаемости, флюидной проницаемости (Баяк И.О. (2013). Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов. [Докторская диссертация, Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН]), открытой пористости и характеристик пустотного пространства породы. Матричной проницаемостью характеризуются области горного массива, состоящие из минеральных зерен и органического вещества (твердое вещество). Флюидную проницаемость имеет пустотное пространство горного массива, которое включает квазиизометрические поры и ориентированные трещины. Матричная проницаемость известна заранее. Флюидную проницаемость определяют по данным измерений проницаемости на отдельных представительных образцах пористых пород.

Недостаток данного способа заключается в том, что не учитывают анизотропию физических свойств горного массива, что не позволяет определить главные значения тензора проницаемости образца породы.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому способу является способ

определения свойств пористых материалов (RU 2492456 C1 - Способ определения характеристик порового пространства и теплопроводности матрицы пористых материалов), заключающийся в измерении теплопроводности образцов пористых материалов, последовательно насыщенных по меньшей мере двумя флюидами с различной теплопроводностью. Для определения открытой пористости, геометрических параметров порового пространства, включающих форму пор и трещин, и теплопроводности матрицы образца пористого материала его поочередно насыщают по меньшей мере двумя флюидами с разной известной теплопроводностью. В качестве по меньшей мере одного насыщающего флюида используют смесь флюидов из по меньшей мере двух флюидов с разной известной теплопроводностью. После каждого насыщения измеряют теплопроводность насыщенного образца пористого материала. По совокупности результатов измерений теплопроводности насыщенного образца пористого материала и с использованием соотношений методов теории эффективных сред определяют открытую пористость, геометрические параметры порового пространства и теплопроводность матрицы образца пористого материала.

Недостатком известного способа является отсутствие возможности определения главных значений тензора проницаемости образца породы по представленному набору измеренных физических свойств образца породы в случае анизотропии его свойств.

РАСКРЫТИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Задачей заявленного изобретения является создание способа определения свойств пористых пород, включая главные значения тензора проницаемости пористых пород, обладающих анизотропией свойств.

Техническим результатом изобретения является обеспечение возможности определения главных значений тензора проницаемости и главных значений тензора теплопроводности матрицы образца пористой породы.

Указанный технический результат достигается за счет того, что предварительно определяют направления главных осей теплопроводности образца породы. Затем последовательно насыщают образец породы двумя флюидами с разной известной теплопроводностью или двумя смесями флюидов. Смесь флюидов получают в результате смешивания по меньшей мере двух флюидов, каждый из которых имеет разную теплопроводность. После каждого насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы. Далее дополнительно насыщают образец породы флюидом, имеющим теплопроводность, отличную от теплопроводности флюидов на предыдущем этапе насыщения, или смесью флюидов, имеющей теплопроводность, отличную от теплопроводности смеси флюидов на предыдущем этапе насыщения и состоящей по меньшей мере двух флюидов. После дополнительного насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы. Затем по результатам вышеуказанных измерений главных значений тензора теплопроводности образца определяют главные значения тензора теплопроводности матрицы, открытую пористость и характеристики пустотного пространства образца породы, используя соотношения теории эффективных сред, учитывающие анизотропию теплопроводности образца породы. Главные значения тензора теплопроводности матрицы, открытую пористость и характеристики пустотного пространства образца породы определяют путем минимизации расхождения между теоретическими и измеренными главными значениями тензора теплопроводности образца, поочередно насыщенного двумя флюидами с разной теплопроводностью или двумя смесями флюидов, и дополнительно насыщенного флюидом, имеющим теплопроводность, отличную от теплопроводности флюидов на предыдущем этапе

насыщения, или смесью флюидов. В качестве меры расхождения используют функцию, представленную как квадратный корень из суммы квадратов относительных расхождений между теоретическими и измеренными главными значениями тензора теплопроводности с суммированием по числу состояний насыщения образца породы (всего 6 слагаемых, по 2 слагаемых для каждого типа насыщения) (1).

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\lambda_{1i}^{\text{изм.}} - \lambda_{1i}^{\text{теор.}}}{\lambda_{1i}^{\text{теор.}}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_{2i}^{\text{изм.}} - \lambda_{2i}^{\text{теор.}}}{\lambda_{2i}^{\text{теор.}}} \right)^2} \quad (1)$$

где D - мера расхождения, i - индекс типа насыщения, $\lambda_{1i}^{\text{изм.}}$ и $\lambda_{2i}^{\text{изм.}}$ - измеренные главные значения тензора теплопроводности для i-го типа насыщения, $\lambda_{1i}^{\text{теор.}}$ и $\lambda_{2i}^{\text{теор.}}$ - теоретические главные значения тензора теплопроводности для i-го типа насыщения.

Главные значения тензора проницаемости образца пористых пород определяют по данным о матричной и флюидной проницаемости, а также по открытой пористости и характеристикам пустотного пространства, определенным по результатам измерений главных значений тензора теплопроводности образца породы при различных насыщающих флюидах или их смесях. Проницаемость флюида определяют на основе измерений главных значений тензора проницаемости, проведенных на отдельном представительном образце пористой породы, и затем используют для определения главных значений тензора проницаемости других схожих образцов пористых пород с учетом заранее известных значений матричной проницаемости, а также с учетом ранее определенных открытой пористости и характеристик пустотного пространства, полученных из набора измеренных данных теплопроводности образца пористой породы.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Изобретение будет более понятным из описания, не имеющего ограничительного характера и приводимого со ссылками на прилагаемые чертежи, на которых изображены:

Фиг. 1. Схема оптического сканирования образца породы (вид сверху) для определения направления главных осей теплопроводности образца породы с поворотом образца на 15 градусов вокруг его оси (а). Результаты измерений кажущейся теплопроводности с определением главных значений тензора теплопроводности (б).

Фиг. 2. Схема установленных направлений главных осей теплопроводности (синие стрелки) на образце породы (вид сверху), вдоль которых проводят измерения главных значений тензора теплопроводности образца породы, насыщенного флюидами.

1 - линия сканирования, 2- первичная отметка маркером, установленная геологом, 3 - направление сканирования через 15 градусов, 4 - скорректированная отметка маркером, 5 - определенные направления главных осей теплопроводности.

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

В соответствии с предложенным способом предварительно определяют направления главных осей теплопроводности образца породы. Затем осуществляют поочередное насыщение образца породы двумя флюидами с разной теплопроводностью или двумя смесями флюидов, и дополнительно насыщают образец породы флюидом, имеющим теплопроводность, отличную от теплопроводности флюидов на предыдущем этапе насыщения, или смесью флюидов, после каждого насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы. Главные значения тензора теплопроводности насыщенного образца породы определяют методом оптического сканирования {Popov Y., Beardsmore G, Clauser C. ISRM Suggested methods

for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure // Rock Mech Rock Eng. 2016. Vo. 49. P. 4179-4207).

Главные значения тензора теплопроводности образцов пористых пород, обладающих анизотропией свойств, определяют на основе соотношений, связывающих кажущуюся теплопроводность (измеренную теплопроводность) с главными компонентами тензора теплопроводности. По результатам измерений определяют значения кажущихся теплопроводностей: $\lambda_1^{\text{каж}}$ – при проведении измерений методом оптического сканирования в направлении, перпендикулярном плоскости напластования образца, и $\lambda_2^{\text{каж}}$ – при проведении измерений методом оптического сканирования в направлении вдоль плоскости напластования. Затем, используя известное соотношение (2) {Popov Y., Beardsmore G, Clauser C. ISRM Suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure // Rock Mech Rock Eng. 2016. Vo. 49. P. 4179-4207), определяют главные компоненты тензора теплопроводности: $\lambda_{||}$ (вдоль плоскости напластования образца) и $\lambda_{\perp}$ (перпендикулярно плоскости напластования образца).

$$\lambda_{\perp} = \frac{(\lambda_2^{\text{каж}})^2}{\lambda_{||}} = \frac{(\lambda_2^{\text{каж}})^2}{\lambda_1^{\text{каж}}} \quad (2)$$

где $\lambda_1^{\text{каж}}$ и $\lambda_2^{\text{каж}}$ – кажущиеся теплопроводности, полученные при проведении измерений методом оптического сканирования в направлениях перпендикулярном плоскости напластования образца и вдоль плоскости напластования образца породы соответственно, $\lambda_{||}$ и $\lambda_{\perp}$ – главные компоненты тензора теплопроводности образца породы.

В качестве насыщающих флюидов могут быть использованы газ с известной теплопроводностью, например, воздух, а также керосин, этиленгликоль или вода.

В случае использования смеси флюидов для приготовления насыщающих флюидов их теплопроводность определяют предварительно по известным значениям теплопроводности и объемной концентрации каждого из смешиваемых флюидов.

Теплопроводность смеси флюидов определяют с использованием модели Лихтенеккера (3) (Новиков, Сергей Васильевич (2017). Тепловые свойства терригенных коллекторов и насыщающих флюидов):

$$\lambda_{\text{смеси}}^* = \prod_{i=1}^N \lambda_i^{\text{фл}} v_i^{\text{фл}} \quad (3)$$

где: $\lambda_{\text{смеси}}^*$ – эффективная теплопроводность смеси, N – количество смешиваемых флюидов, $v_i^{\text{фл}}$ – объемная концентрация i-ого флюида, $\lambda_i^{\text{фл}}$ – теплопроводность i-ого флюида. В соответствии с другим вариантом осуществления изобретения теплопроводность смеси флюидов определяют путем измерения теплопроводности смеси после смешивания флюидов.

Измеренные главные значения тензора теплопроводности образца породы, последовательно насыщенного различными флюидами или их смесями, используют для определения открытой пористости и характеристик пустотного пространства, что необходимо для вычисления главных значений тензора проницаемости, а также используют для дополнительного определения главных значений тензора теплопроводности матрицы. Главные значения тензора теплопроводности матрицы,

открытую пористость и характеристики пустотного пространства образца породы определяют через соотношения, учитывающие анизотропию теплопроводности образца. Например, для этой цели могут быть использованы соотношения метода обобщенного сингулярного приближения в модификации f-модель в теории эффективных сред, раскрытые ниже (Evgeny Chesnokov, Irina Bayuk, and Yasser Metwally, (2010), "Inversion of shale microstructure parameters from permeability measurements," SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2634-2638. <https://doi.org/10.1190/1.3513387>).

Измерения теплопроводности осуществляют таким образом, что по итогам измерений вдоль одного из направлений главных осей теплопроводности образца породы определяют одно из главных значений тензора теплопроводности для заданного направления, определяемого в главной системе координат XYZ вектором $n=(n_1, n_2, n_3)$. Главная система координат определяется симметрией образца породы и должна совпадать с направлениями главных осей теплопроводности, в которой тензор теплопроводности имеет диагональный вид. Тогда теплопроводность для любого заданного направления в главной системе координат определяется по известной формуле (4):

$$\lambda^{*(n)} = \lambda_{11}n_1^2 + \lambda_{22}n_2^2 + \lambda_{33}n_3^2 \quad (4)$$

где $\lambda^{*(n)}$ эффективная теплопроводность вдоль заданного направления, определяемого вектором $n=(n_1, n_2, n_3)$, где n_1, n_2, n_3 - компоненты вектора, которые соответствуют проекциям вектора на оси X, Y и Z соответственно. $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}$ главные значения теплопроводности в направлениях, соответствующих осям X, Y и Z.

Тензор теплопроводности горной породы выражают через тензор теплопроводности матрицы λ^M тензор теплопроводности флюида λ^{FL} , объемную концентрацию v и характеристики пустотного пространства каждой i -ой компоненты модели, которая аппроксимирует образец породы, состоящей из N компонент, следующим образом (Bayuk, I, Popov, Y., Par shin, A.: A new powerful tool for interpreting and predicting in reservoir geophysics: theoretical modeling as applied to laboratory measurements of thermal properties'. Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts, Austin, Texas, USA, 2011) (5):

$$\lambda^* = \left\langle \sum_i^N v_i \lambda_i \int P_i(\alpha_i; \theta; \varphi; \psi) [\mathbf{I} - \mathbf{g}_i \lambda]^{-1} \sin \theta d\alpha_i d\theta d\varphi d\psi \right\rangle \cdot \left(\sum_i^N v_i \int P_i(\alpha_i; \theta; \varphi; \psi) [\mathbf{I} - \mathbf{g}_i \lambda]^{-1} \sin \theta d\alpha_i d\theta d\varphi d\psi \right)^{-1} \quad (5)$$

где треугольные скобки означают усреднение по объему, которое производится по всем компонентам с использованием их объемных концентраций; N - количество компонент модели; λ^* - тензор теплопроводности 2-го ранга; λ - разность между λ_i и λ^C , где λ_i - тензор теплопроводности i -ой компоненты, а λ^C - тензор теплопроводности, определяемый как «тело сравнения»; $\mathbf{I}$ - единичный тензор 2-го ранга; v_i - объемная концентрация i -й компоненты; P_i - функция плотности вероятности формы и ориентации i -ой компоненты. Форма компонент описывается количественным параметром аспектным отношением эллипсоидов вращения α_i . Ориентация компонент описывается углами Эйлера (θ, φ, ψ). Тензор $\mathbf{g}_i$ определяется формой компонент и свойствами тела

сравнения, для теплопроводности тензор g_i определяется следующим образом (Bayuk, I. O., and Chesnokov, E. M.: 'Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media', Phys. Chem. Earth, 1998, 23, (3), pp.361-366) (6):

$$g_i = g_{kl} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi n_{kl} (\lambda_{mn}^c n_m n_n)^{-1} \sin\theta d\theta d\varphi \quad (6)$$

$$n_1 = \frac{1}{a_1} \sin\theta \cos\varphi, \quad n_2 = \frac{1}{a_2} \sin\theta \sin\varphi, \quad n_3 = \frac{1}{a_3} \cos\theta$$

где a_1 , a_2 и a_3 полуоси эллипсоидов, описывающих форму компонент.

В методе обобщенного сингулярного приближения в модификации f-модель теории эффективных сред диагональный тензор теплопроводности «тела сравнения» λ^C представляют как линейную комбинацию диагональных тензоров теплопроводности матрицы и флюида, заполняющего пустотное пространство образца породы, дополненную безразмерным параметром f , определяющим степень связанности пустотного пространства. Теплопроводность «тела сравнения» $\lambda^{C(n)}$ для заданного направления в главной системе координат XYZ, определяемого вектором n , выражают через известную формулу (Bayuk, I. O., and Chesnokov, E. M.: 'Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media', Phys. Chem. Earth, 1998, 23, (3), pp.361-366) (7):

$$\lambda^{C(n)} = (1 - f)\lambda^{M(n)} + f\lambda^{FL(n)} \quad (7)$$

где - теплопроводность «тела сравнения» вдоль заданного направления, определяемого вектором $n=(n_1, n_2, n_3)$, где n_1, n_2, n_3 - компоненты вектора, которые соответствуют проекциям вектора на оси X, Y и Z соответственно, f - параметр связанности пустотного пространства, λ^M и λ^{FL} - теплопроводности матрицы и флюида соответственно в заданном направлении, определяемом вектором $n=(n_1, n_2, n_3)$.

Главные значения тензора теплопроводности матрицы, открытую пористость и характеристики пустотного пространства образца породы определяют путем минимизации расхождений между теоретическими и измеренными главными значениями тензора теплопроводности образца породы. Теоретические главные значения тензора теплопроводности образца породы определяют с использованием соотношений 5-7. В качестве меры расхождения используют функцию, представленную как квадратный корень из суммы квадратов относительных расхождений между теоретическими и измеренными главными значениями тензора теплопроводности с суммированием по числу состояний насыщения образца породы (2). Расхождение между теоретическими и измеренными главными значениями тензора теплопроводности образца породы не должно превышать заданного значения, которое определяют заранее метрологическими характеристиками аппаратуры, используемой для измерения главных значений тензора теплопроводности насыщенного образца породы, в данном случае - прибора оптического сканирования.

Главные значения тензора проницаемости образца породы определяют по известным формулам 8-10

$$\mathbf{k}^* = \left\langle \sum_i^N v_i \mathbf{k}_i \int P_i(\alpha_i; \theta; \varphi; \psi) [\mathbf{I} - \mathbf{g}_i \mathbf{k}]^{-1} \sin \theta d\alpha_i d\theta d\varphi d\psi \right\rangle \cdot \left(\sum_i^N v_i \int P_i(\alpha_i; \theta; \varphi; \psi) [\mathbf{I} - \mathbf{g}_i \mathbf{k}]^{-1} \sin \theta d\alpha_i d\theta d\varphi d\psi \right)^{-1} \quad (8)$$

где треугольные скобки означают усреднение по объему, которое производится по всем компонентам с использованием их объемных концентраций; N - количество компонент модели; $\mathbf{k}^*$ - тензор проницаемости 2-го ранга; $\mathbf{k}$ - разность между $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}^C$, где $\mathbf{k}_1$ - тензор проницаемости i-ой компоненты, а $\mathbf{k}^C$ тензор проницаемости, определяемый как «тело сравнения»; $\mathbf{I}$ - единичный тензор 2-го ранга; v_i - объемная концентрация i-й компоненты; P_i - функция плотности вероятности формы и ориентации i-ой компоненты. Форма компонент описывается количественным параметром - аспектным отношением эллипсоидов вращения α_i . Ориентация компонент описывается углами Эйлера (θ, φ, ψ). Тензор $\mathbf{g}_i$ определяется формой компонент и свойствами тела сравнения, для проницаемости тензор $\mathbf{g}_i$ определяется следующим образом (Bayuk, I. O., and Chesnokov, E. M.: 'Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media', Phys. Chem. Earth, 1998, 23, (3), pp.361-366) (9)

$$\mathbf{g}_i = \mathbf{g}_{kl} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathbf{n}_{kl} (\mathbf{k}_{mn}^c \mathbf{n}_m \mathbf{n}_n)^{-1} \sin \theta d\theta d\varphi \quad (9)$$

$$n_1 = \frac{1}{a_1} \sin \theta \cos \varphi, \quad n_2 = \frac{1}{a_2} \sin \theta \sin \varphi, \quad n_3 = \frac{1}{a_3} \cos \theta$$

где a_1, a_2 и a_3 полуоси эллипсоидов, описывающих форму компонент.

В методе обобщенного сингулярного приближения в модификации f-модель в теории эффективных сред диагональный тензор проницаемости «тело сравнения» $\mathbf{k}^C$ представляют как линейную комбинацию диагональных тензоров матричной проницаемости и флюидной проницаемости, дополненную безразмерным параметром f, определяющим степень связанности пустотного пространства. Проницаемость «тела сравнения» $\mathbf{k}^{C(n)}$ для заданного направления в главной системе координат XYZ, определяемого вектором n, выражают с использованием известной формулы (Бауик, I. O., and Chesnokov, E. M.: 'Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media', Phys. Chem. Earth, 1998, 23, (3), pp.361-366) (10):

$$\mathbf{k}^{C(n)} = (1 - f) \mathbf{k}^{M(n)} + f \mathbf{k}^{FL(n)} \quad (10)$$

где $\mathbf{k}^{C(n)}$ - проницаемость «тела сравнения» вдоль заданного направления, определяемого вектором $\mathbf{n}=(n_1, n_2, n_3)$, где n_1, n_2, n_3 - компоненты вектора, которые соответствуют проекциям вектора на оси X, Y и Z соответственно, f - параметр связанности пустотного пространства, $\mathbf{k}^M$ и $\mathbf{k}^{FL}$ матричная проницаемость и флюидная проницаемость соответственно в заданном направлении, определяемом вектором $\mathbf{n}=(n_1, n_2, n_3)$.

Матричную проницаемость образца породы определяют заранее. Флюидную проницаемость определяют на основе измерений главных значений тензора проницаемости, проведенных на отдельном представительном образце пористой породы, а также с учетом заранее известного значения матричной проницаемости, ранее

5 определенных открытой пористости и характеристик пустотного пространства, определенных по набору измерений теплопроводности образца пористой породы.

Ниже представлены примеры реализации предлагаемого изобретения, которые представляет собой определение главных значений тензора проницаемости на основе открытой пористости и характеристик пустотного пространства образца породы, а

10 также дополнительное определение главных значения тензора теплопроводности матрицы образца породы, определенных по результатам измеренных главных значений тензора теплопроводности для образцов песчаника диаметром 3 см и длиной 3 см.

Пример 1

Для образца породы предварительно определяют направления главных осей

15 теплопроводности с использованием метода оптического сканирования. На Фиг. 1а представлена схема определения направлений главных осей теплопроводности образца породы при последовательном повороте образца породы на 15 градусов вокруг его оси, что позволяет точно определить направления главных осей теплопроводности образца. На Фиг. 1б представлены результаты измерений кажущейся теплопроводности

20 в зависимости от угла поворота образца вокруг его оси, которые необходимы для определения главных значений тензора теплопроводности и ее анизотропии с использованием соотношения (2). После определения направлений главных осей теплопроводности образца породы на поверхности образца вдоль этих осей наносят метки маркером, что позволяет точно зафиксировать ориентацию направлений главных

25 осей теплопроводности образца породы для использования при последующих измерениях. После определения направлений главных осей теплопроводности образца породы осуществляют поочередное насыщение образца породы двумя флюидами с измеренной отличающейся теплопроводностью или двумя смесями флюидов, и дополнительно насыщают образец породы флюидом, имеющим измеренную

30 теплопроводность, отличную от теплопроводности флюидов на предыдущем этапе насыщения, или смесью флюидов.

В первом примере реализации изобретения рассмотрен случай, когда в качестве насыщающих флюидов выбраны воздух, модель пластовой воды и нефть, теплопроводности которых измерены с помощью прибора KD2 Pro и составляет 0,025,

35 0,60 и 0,12 Вт/(м·К) соответственно. Образцы породы последовательно насыщаются каждым из флюидов с использованием установки «ПИК-СК» (Геологика, 2021 с. Оборудование для исследования керна, пластовых флюидов и материалов ГПП. 11. https://geologika.ru/wp-content/uploads/2022/02/catalog_geologika_21_Web_RUS.pdf) при давлении 15 МПа для обеспечения полного заполнения пустотного пространства

40 образца породы флюидами. После каждого насыщения образца определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы при проведении измерений вдоль главных осей теплопроводности, обозначенных специальными метками, которые были нанесены на образец породы в ходе предварительного определения направлений главных осей теплопроводности образца породы. После каждого измерения

45 теплопроводности образец экстрагируют для удаления флюида и высушивают до 105°C. Затем образец породы насыщают следующим флюидом. На Фиг. 2 представлена схема установленных и отмеченных направлений главных осей теплопроводности (синие стрелки) на образце породы (вид сверху), вдоль которых проводят измерение главных

значений тензора теплопроводности образца породы, насыщенного флюидом.

Главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измеренные перпендикулярно плоскости напластования образца породы ($\lambda_{||}=\lambda_{11}=\lambda_{22}$), равны 3,43, 4,12 и 3,82 Вт/(м·К) соответственно. Главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измеренные вдоль плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\perp}=\lambda_{33}$), равны 2,43, 3,30 и 2,93 Вт/(м·К) соответственно.

По результатам измерений главных значений тензора теплопроводности определяют главные значения тензора теплопроводности матрицы, открытую пористость и характеристики пустотного пространства образца породы через соотношения 4-6. Ориентация пор считается хаотичной, при этом ориентацию трещин определяют по направлению главной оси теплопроводности с наименьшим значением или по направлению, перпендикулярному направлению напластования образца породы.

Для определения главных значений тензора теплопроводности матрицы, открытой пористости и характеристик пустотного пространства образца породы задают области возможных изменений каждого из физических свойств. Изменение теплопроводности матрицы образца породы задают в диапазоне ее возможных значений 2,8-4,4 Вт/(м·К). Для образца породы диапазон изменения открытой пористости выбирают 2-6%, основываясь на каротажных данных о пористости для интервала глубин, с которых образец был извлечен. Аспектное отношение квазиизометричных пор фиксировано и равно 1, при этом областью изменения аспектного отношения трещин является интервал от 0,001 до 0,1. (Berezina, I., Bayuk, I.: 'Pore Space Connectivity in Different Rock-Physics Methods - Similarity and Differences', Appl. Sci., 2022, 12). Изменение параметра степени связности пустотного пространства задают в диапазоне от 0 до 1. Вышеперечисленные физические свойства определяют путем минимизации функции, которая описывает степень отклонения теоретических значений теплопроводности от измеренных значений теплопроводности образца породы при каждом его насыщении. В качестве функции минимизации используют квадратный корень из суммы квадратов относительных расхождений между теоретическими и измеренными главными значениями тензора теплопроводности с суммированием по числу состояний насыщения образца породы (2). Для образца породы определено главное значение теплопроводности матрицы образца породы в направлении, перпендикулярном плоскости напластования

($\lambda_{||}^M = \lambda_{11}^M = \lambda_{22}^M$), равное 4,30 Вт/(м·К), главное значение теплопроводности матрицы

образца породы вдоль плоскости напластования ($\lambda_{\perp}^M=\lambda_{33}^M$) равно 3,52 Вт/(м·К).

Найденная открытая пористость равна 5%, аспектное отношение трещин равно 0,001, параметр связности пустотного пространства равен 0,2. Найденная открытая пористость совпадает с открытой пористостью, измеренной методом гидростатического взвешивания, который используется для тестирования предложенного способа.

Ранее определенные по результатам измерений главных значений тензора теплопроводности образца породы при различных насыщающих флюидах физические свойства образца породы, как открытая пористость и характеристики пустотного пространства образца породы, а также данные о матричной проницаемости и флюидной проницаемости используют для определения главных значений тензора проницаемости породы. Проницаемость матрицы образца породы устанавливают равной 10^{-10} мД. Проницаемость флюида определяют с использованием заранее измеренных главных значений тензора проницаемости минимум для одного представительного образца

пористой породы через соотношения 8-10. Главные значения тензора проницаемости образца породы определяют с использованием соотношения 7-9. Для образца породы определены главные значения проницаемости образца породы: проницаемость в направлении, перпендикулярном плоскости напластования образца породы ($k_{\perp}=k_{11}=k_{22}$), составляет 0,5 мД, проницаемость образца породы вдоль плоскости напластования образца породы ($k_{\perp}=k_{33}$) составляет 4 мД.

Пример 2

Пример 2 отличается от примера 1 тем, что в качестве насыщающих флюидов на первом этапе насыщения выбраны воздух, модель пластовой воды, а на втором этапе насыщения смесь, полученная при смешении модели пластовой воды и этиленгликоля в пропорции 0,6 к 0,4 соответственно, теплопроводности которых измерены с помощью прибора KD2 Pro и составляет 0,025, 0,60 и 0,42 Вт/(м·К) соответственно. В данном примере реализации главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измерены перпендикулярно плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\parallel}=\lambda_{11}=\lambda_{22}$) и равны 3,43, 4,12 и 3,80 Вт/(м·К), соответственно. Главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измерены вдоль плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\perp}=\lambda_{33}$) и равны 2,43, 3,30 и 2,62 Вт/(м·К) соответственно. Главное значение теплопроводности матрицы образца породы измеренное в направлении, перпендикулярном плоскости напластования ($\lambda_{\parallel}^M = \lambda_{11}^M = \lambda_{22}^M$), равно 4,28 Вт/(м·К), а также главное значение теплопроводности матрицы образца породы измеренное в направлении, вдоль плоскости напластования ($\lambda_{\perp}^M=\lambda_{33}^M$), равно 3,53 Вт/(м·К).

Найденная открытая пористость равна 5%, аспектное отношение трещин равно 0,001, параметр связности пустотного пространства равен 0,2. Для образца породы определены главные значения проницаемости образца породы: проницаемость в направлении, перпендикулярном плоскости напластования образца породы ($k_{\parallel}=k_{11}=k_{22}$), составляет 0,5 мД, проницаемость образца породы вдоль плоскости напластования образца породы ($k_{\perp}=k_{33}$) составляет 4,2 мД.

Пример 3

Пример 3 отличается от предыдущих тем, что в качестве насыщающих флюидов на первом этапе насыщения выбраны две смеси флюидов, первая из которых получена при смешении модели пластовой воды и этиленгликоля в пропорции 0,6 к 0,4 соответственно, а вторая - при смешении модели пластовой воды и нефти в пропорции 0,9 к 0,1, а на втором этапе насыщения - модель пластовой воды соответственно, теплопроводности которых измерены с помощью прибора KD2 Pro и составляет 0,42, 0,51 и 0,60 Вт/(м·К) соответственно. В данном примере реализации главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измеренные перпендикулярно плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\parallel}=\lambda_{11}=\lambda_{22}$) равны 3,80, 4,02 и 4,12 Вт/(м·К), соответственно. Главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измеренные вдоль плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\perp}=\lambda_{33}$) равны 2,62, 3,18 и 3,30 Вт/(м·К), соответственно. Главное значение теплопроводности матрицы образца породы, измеренное в направлении, перпендикулярном плоскости напластования ($\lambda_{\parallel}^M=\lambda_{11}^M=\lambda_{22}^M$), равно 4,33 Вт/(м·К), и главное значение теплопроводности матрицы

образца породы, измеренное в направлении, вдоль плоскости напластования ($\lambda_{\perp}^M = \lambda_{33}^M$), равно 3,50 Вт/(м·К). Найденная открытая пористость равна 5%, аспектное отношение трещин равно 0,001, параметр связности пустотного пространства равен 0,2. Для образца породы определены главные значения проницаемости образца породы: проницаемость в направлении, перпендикулярном плоскости напластования образца породы ($k_{\parallel} = k_{11} = k_{22}$), составляет 0,7 мД, проницаемость образца породы вдоль плоскости напластования образца породы ($k_{\perp} = k_{33}$) составляет 4 мД.

Пример 4

Пример 4 отличается от предыдущих тем, что в качестве насыщающих флюидов на первом этапе насыщения выбраны две смеси флюидов, первая из которых получена при смешении модели пластовой воды и этиленгликоля в пропорции 0,6 к 0,4 соответственно, а вторая - при смешении модели пластовой воды и нефти в пропорции 0,9 к 0,1, а на втором этапе насыщения смесь, полученная при смешении модели пластовой воды и нефти в пропорции 0,5 к 0,5, соответственно, теплопроводности которых измерены с помощью прибора KD2 Pro и составляет 0,42, 0,51 и 0,28 Вт/(м·К) соответственно. В данном примере реализации главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измеренные перпендикулярно плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\parallel} = \lambda_{11} = \lambda_{22}$) равны 3,80, 4,02 и 3,61 Вт/(м·К), соответственно. Главные значения тензора теплопроводности образца породы, насыщенного последовательно флюидами 1-3, измеренные вдоль плоскости напластования образца породы ($\lambda_{\perp} = \lambda_{33}$) равны 2,62, 3,18 и 2,36 Вт/(м·К), соответственно. Главное значение теплопроводности матрицы образца породы, измеренное в направлении, перпендикулярном плоскости напластования ($\lambda_{\parallel}^M = \lambda_{11}^M = \lambda_{22}^M$), равно 4,34 Вт/(м·К), и главное значение теплопроводности матрицы образца породы, измеренное в направлении, вдоль плоскости напластования ($\lambda_{\perp}^M = \lambda_{33}^M$), равно 3,54 Вт/(м·К). Найденная открытая пористость равна 5%, аспектное отношение трещин равно 0,001, параметр связности пустотного пространства равен 0,2. Для образца породы определены главные значения проницаемости образца породы: проницаемость в направлении, перпендикулярном плоскости напластования образца породы ($k_{\parallel} = k_{11} = k_{22}$), составляет 0,7 мД, проницаемость образца породы вдоль плоскости напластования образца породы ($k_{\perp} = k_{33}$) составляет 4 мД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Irina Bayuk, Gennady Goloshubin, Yuriy Tcimbaluk and Fedor Borkun (2016). Rock-physics based prediction of hydraulic permeability and thermal conductivity of anisotropic clastic rocks from logging data, [online] doi:<https://doi.org/10.1190/segam2016-13762472.1>.
2. RU 2492456 C1 - Способ определения характеристик порового пространства и теплопроводности матрицы пористых материалов - Яндекс. Патенты. [online] Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU_2492456_C1_20130910 [Accessed 8 Nov. 2024].
3. Popov Y., Beardsmore G., Clauser C. ISRM Suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure // Rock Mech Rock Eng. 2016. Vo. 49. P.4179-4207.
4. Bayuk, I. O., and Chesnokov, E. M.: 'Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media', Phys. Chem. Earth, 1998, 23, (3), pp.361-366.
5. Bayuk, I., Popov, Y., Parshin, A.: 'A New powerful tool for interpreting and predicting in reservoir geo-physics: theoretical modeling as applied to laboratory measurements of thermal properties'. Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts, Austin,

Texas, USA, 2011.

6. SEG Technical Program Expanded Abstracts. (2022). Inversion of shale microstructure parameters from permeability measurements SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010. [online] Available at: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.3513387> [Accessed 12 Nov. 2024].

7. Геология, 2021с. Оборудование для исследования керна, пластовых флюидов и материалов ГПП. 11. http://geologika.ru/wp-content/uploads/2022/02/catalog_geologika_21_Web_RUS.pdf.

8. Evgeny M. Chesnokov, Irina O. Bayuk, and Yasser Metwally, (2010), "Inversion of shale microstructure parameters from permeability measurements," SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2634-2638. <https://doi.org/10.1190/1.3513387>.

9. Новиков, Сергей Васильевич (2017). Тепловые свойства терригенных коллекторов и насыщающих флюидов. [online] disserCat. Available at: <https://www.dissercat.com/content/teplovye-svoistva-terrigennykh-kollektorov-i-nasyshchayushchikh-flyuidov> [Accessed 14 Nov. 2024].

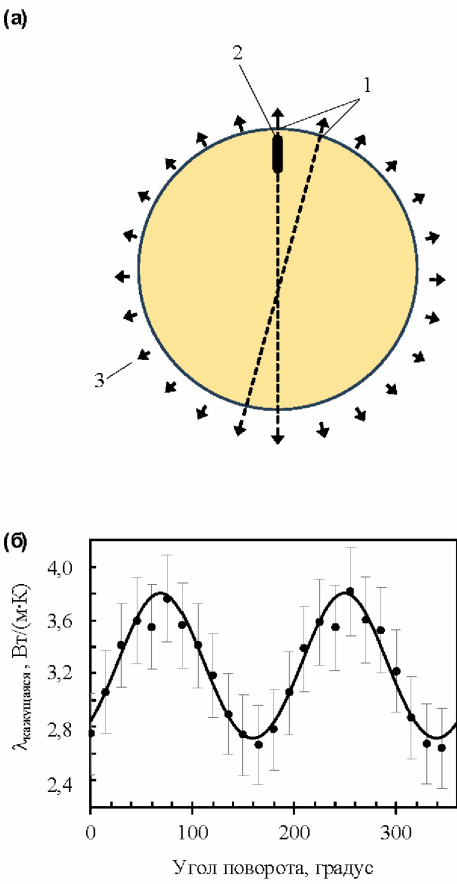
10. Berezina, I., Bayuk, I.: 'Pore Space Connectivity in Different Rock-Physics Methods - Similarity and Differences', Appl. Sci., 2022, 12.

11. Баяк И.О. (2013). Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов. [Докторская диссертация, Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН].

(57) Формула изобретения

1. Способ определения главных значений тензора проницаемости образца породы, включающий определение направления главных осей теплопроводности образца породы, поочередное насыщение образца породы двумя флюидами с разной теплопроводностью или двумя смесями флюидов, имеющими разную теплопроводность и полученными в результате смешивания по меньшей мере двух флюидов, каждый из которых имеет разную теплопроводность, при этом после каждого насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы, далее дополнительно насыщают образец породы флюидом, имеющим теплопроводность, отличную от теплопроводности флюидов на предыдущем этапе насыщения, или смесью флюидов, имеющей теплопроводность, отличную от теплопроводности смеси флюидов на предыдущем этапе насыщения и состоящей по меньшей мере двух флюидов, далее после дополнительного насыщения образца породы определяют главные значения тензора теплопроводности образца породы, затем по результатам вышеуказанных измерений главных значений тензора теплопроводности образца определяют главные значения тензора теплопроводности матрицы, открытую пористость и характеристики пустотного пространства, по значениям которых определяют искомые главные значения тензора проницаемости образца породы.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что характеристики пустотного пространства образца породы включают в себя форму пустотного пространства и параметр связанности пустотного пространства.



Фиг. 1

