

УДК 552.1:536

## Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности флюидонасыщенных горных пород при различных термобарических условиях для оценки коллекторских свойств нефтяных и газовых месторождений

С.Н. Эмиров<sup>1\*</sup>, Э.Н. Рамазанова<sup>2</sup>, М.А. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Российская Федерация, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д.39а

<sup>2</sup> Дагестанский государственный технический университет, Российская Федерация, 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 70

<sup>3</sup> Тамбовский государственный технический университет, Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112

\* E-mail: wemirov@mail.ru

**Тезисы.** Абсолютным стационарным методом плоского слоя измерены значения коэффициента эффективной теплопроводности образцов флюидонасыщенного песчаника (газ, вода, нефть) в условиях высоких гидростатических давлений до 400 МПа в области температур 275...423 К. Результаты экспериментальных измерений влияния температуры и давления на эффективную теплопроводность флюидонасыщенных образцов песчаника показывают, что полная зависимость может быть описана степенным законом.

**Ключевые слова:** стационарный метод плоского слоя, эффективная теплопроводность, флюидонасыщение, температура, высокое давление, степень кристаллизации.

Процессы разработки и эксплуатации нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений тесно связаны со свойствами пород-коллекторов. Бурение, выбор способа эксплуатации, методов интенсификации добычи, методов повышения коэффициента извлечения нефти и газа в какой-то степени зависят от теплофизических свойств горных пород-коллекторов и их поведения при различных воздействиях.

Изучению пород-коллекторов и процессов движения через них жидких и газообразных флюидов также придается большое значение в связи с поисками и разведкой нефтяных и газовых месторождений. Важную роль играет оценка тепловых свойств горных пород в условиях их естественного залегания. При этом одним из основных параметров горных пород, характеризующим их теплофизические свойства, является коэффициент эффективной теплопроводности ( $\lambda_{эф}$ ), который согласно закону Фурье

$$q = -\lambda_{эф} \text{grad} \Delta T \quad (1)$$

описывает зависимость между плотностью теплового потока  $q = \frac{Q}{S}$  (где  $Q$  – количество тепла в единицу времени;  $S$  – площадь) и градиентом температуры  $\text{grad} \Delta T = \frac{T_2 - T_1}{h_2 - h_1}$ ,

(где  $T_1, T_2$  – соответственно пластовые температуры на глубинах  $h_1$  и  $h_2$ ).

Результаты экспериментальных измерений  $\lambda_{эф}$  флюидонасыщенных горных пород, в том числе абсолютным стационарным методом плоского слоя, позволяют оценить их тепловые и коллекторские свойства при создании условий, приближенных к условиям естественного залегания. Для измерений были взяты образцы песчаника (месторождение РФ, Буйнакский перевал, поверхностные отложения, открытая пористость 16,2 %, плотность  $2,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) [1–2]. Результаты измерений, представленные в таблице и на рис. 1, 2 показывают, что зависимость эффективной теплопроводности

### Зависимость $\lambda_{эф}$ , Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>, флюидонасыщенного песчаника от давления и температуры:

$\lambda_{400}$ ,  $\lambda_{100}$ ,  $\lambda_0$  – теплопроводность материала при  $P = 400$ ; 100 и 0 МПа соответственно

T, К	P, МПа							
	0,1	50	$100/\frac{\lambda_{100}}{\lambda_0}$	150	200	250	300	$400/\frac{\lambda_{400}}{\lambda_0}$
Газонасыщенный песчаник								
275	0,62	0,76	0,84 / <b>1,35</b>	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90 / <b>1,44</b>
323	0,64	0,77	0,85 / <b>1,33</b>	0,89	0,90	0,90	0,92	0,92 / <b>1,44</b>
373	0,67	0,81	0,87 / <b>1,30</b>	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95 / <b>1,41</b>
423	0,70	0,84	0,91 / <b>1,30</b>	0,93	0,90	0,95	0,95	0,98 / <b>1,40</b>
+n	0,27	0,24	0,18 / –					0,18 / –
Нефтенасыщенный песчаник								
275	1,64	1,81	1,84 / <b>1,12</b>	1,86	1,87	1,89	–	– / <b>1,15</b>
323	1,69	1,83	1,86 / <b>1,10</b>	1,87	1,89	1,91	–	– / <b>1,14</b>
373	1,70	1,87	1,90 / <b>1,11</b>	1,91	1,92	1,96	–	– / <b>1,15</b>
423	1,73	1,91	1,93 / <b>1,11</b>	1,94	1,95	1,98	–	– / <b>1,14</b>
+n	0,10					0,08		
Влагонасыщенный песчаник								
275	2,25	2,43	2,46 / <b>1,09</b>	2,47	2,48	2,50	2,51	2,52 / <b>1,12</b>
323	2,26	2,44	2,46 / <b>1,09</b>	2,48	2,49	2,51	2,52	2,53 / <b>1,11</b>
373	2,27	2,45	2,46 / <b>1,08</b>	2,49	2,50	2,53	2,53	2,54 / <b>1,11</b>
423	2,30	2,48	2,48 / <b>1,08</b>	2,52	2,53	2,53	2,55	2,55 / <b>1,11</b>
+n	0,04	0,037	0,039 / –	0,036	0,034	0,03	0,029	0,021 / –

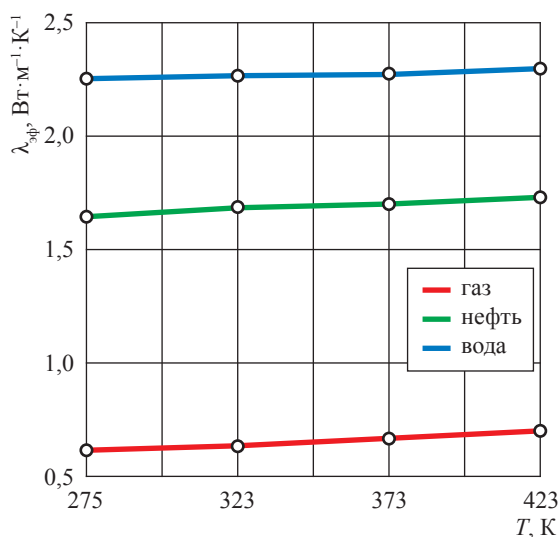


Рис. 1. Зависимость эффективной теплопроводности песчаника от температуры и вида насыщающего флюида

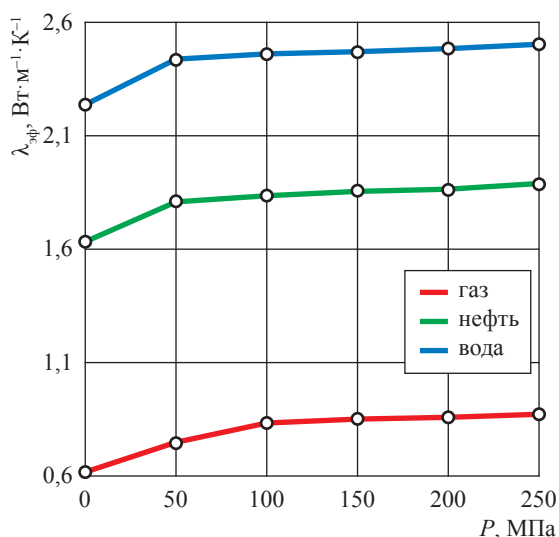


Рис. 2. Зависимость теплопроводности песчаника от давления и вида насыщающего флюида

флюидонасыщенного песчаника от давления ( $P$ ) и температуры может быть описана степенным законом:

$$\lambda_{эф}(P, T) \approx T^{n-\alpha P}, \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{dn}{dP}.$$

Так, зависимость эффективной теплопроводности образцов газонасыщенного песчаника при атмосферном давлении незначительно увеличивается и описывается равенством  $\lambda_{эф}(T) \approx T^{+0,27}$  (см. 8-ю строку в таблице, где при  $P = 0,1$  МПа,  $n = 0,27$ ), что свидетельствует о том, что структура породы частично окристаллизована и содержит более 40 % химических элементов в аморфном состоянии [4].

Пористость исследуемого газонасыщенного песчаника (16,2 %) в нефтенасыщенном состоянии приводит к увеличению  $\lambda_{эф}$  в 2,5 раза, а в водонасыщенном – в 3,5 раза, при этом она слабо зависит от температуры (см. рис. 1 и таблицу).

Под гидростатическим давлением наблюдается нелинейная зависимость теплопроводности образцов песчаника от давления, когда наиболее интенсивный рост теплопроводности происходит в области до  $P = 100$  МПа, а затем нелинейная зависимость переходит в слабую линейную зависимость. Существующие теоретические и экспериментальные данные подтверждают возникновение в начальной стадии давления обратимого фазового перехода 2-го рода, который может происходить по разным механизмам за счет любого незначительного смещения атомов в кристаллической решетке, незначительного относительного изменения элементарного объема [4].

Влияние давления и температуры на некоторые поликристаллические соединения приводит к их переходу из хрупкого состояния в пластическое [4]. В свою очередь, снижение давления, действующего на тело, не испытывающее необратимых изменений структуры, сопровождается упругим восстановлением первоначального объема тела.

Прямой и обратный ход зависимости  $\lambda_{эф}(P)$  исследуемых образцов флюидонасыщенного песчаника не показывает эффекта гистерезиса, что опровергает объяснения некоторых авторов о захлопывании пор и уплотнении контактов между зернами в начальной стадии давления.

Значительную роль при этом играет насыщающий флюид. В таблице и на рис. 2 видно,

что всестороннее давление до 400 МПа увеличивает  $\lambda_{эф}$ :

- газонасыщенного песчаника на 44 %, из которых 35 % приходится на начальную область  $P$  до 100 МПа,
- нефтенасыщенного на 15 %, из них 12 % – в начальной области  $P$  до 100 МПа,
- водонасыщенного на 12 %, из которых 9 % попадают в начальную область  $P$  до 100 МПа.

Таким образом, насыщение приводит к ослаблению зависимости  $\lambda_{эф}(P)$  образцов песчаника.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00059а).*

### Список литературы

1. Emirov S.N. Thermal conductivity of certain rocks under high pressure and temperatures / S.N. Emirov // High Pressure Investigations in Geosciences. – Berlin, 1989. – С. 123–126.
2. Abdulgatova Z. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone / Z. Abdulgatova, I.M. Abdulgatov, S.N. Emirov // Inter. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2009. – № 49. – С. 1055–1071.
3. ГСССД МЭ 250-2016. Методика экспериментального определения теплопроводности твердых тел в условиях всестороннего сжатия / Н.Л. Крамынина, С.М. Лугуев, Н.В. Лугуева и др. – М.: ВНИИМС, 2016.
4. Галкин А.А. К теории поглощения звука при переходе материала из хрупкого в пластическое состояние / А.А. Галкин, В.Г. Барьяхтар // ДАН СССР. – 1978. – Т. 239. – № 4. – С. 835–837.

## Experimental studies of the coefficient of effective heat conductivity of fluid-saturated rocks under different thermobaric conditions for assessing collector properties of oil and gas fields

S.N. Emirov<sup>1\*</sup>, E.N. Ramazanova<sup>2</sup>, M.A. Kuznetsov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Bld. 39a, prospect Imama Shamilya, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367030, Russian Federation

<sup>2</sup> Dagestan State Technical University, Bld. 70, prospect Imama Shamilya, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367015, Russian Federation

<sup>3</sup> Tambov State Technical University, Bld. 112, Michurinskaya street, Tambov, 392000, Russian Federation

\* E-mail: wemirov@mail.ru

**Keywords:** effective thermal conductivity coefficient, stationary flat layer method, fluidal saturation, temperature, high pressure, extent of crystallization.

**Abstract.** Effective thermal conductivity of sandstone samples with different fluid saturation (gas, water, oil) was measured under high hydrostatic pressures up to 400 MPa in the temperature range of 275...423 K using an absolute stationary flat layer method. Intensive heat conduction growth occurred in the pressure range up to 100 MPa. There was no hysteresis effect during forward and reverse loading of the sample by external pressure.

Authors suggested a theoretical interpretation of the established experimental laws of thermal conductivity behavior for a combination of crystalline and amorphous rock structures.

#### References

1. EMIROV, S.N. Thermal conductivity of certain rocks under high pressure and temperatures. In: *High Pressure Investigations in Geosciences*. Berlin, 1989, pp. 123–126.
2. ABDULAGATOVA Z., I.M. ABDULAGATOV, S.N. EMIROV. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone. *Inter. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2009, no. 49, pp. 1055–1071. ISSN 1365-1609.
3. ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE OF METROLOGICAL SERVICE. GSSSD ME 250-2016. *Procedure for experimental determination of heat conductivity of solid bodies in conditions of triaxial compression* [Metodika eksperimentalnogo opredeleniya teploprovodnosti tverdykh tel v usloviyakh vsestoronnego szhatiya]. Authors: N.L. KRAMYNINA, S.M. LUGUYEV, N.V. LUGUYEVA et al. Moscow, 2016. (Russ.).
4. GALKIN, A.A., V.G. BARYAKHTAR. To the theory of acoustic reduction at transition of a material from brittle state to plastic state [K teorii pogloshcheniya zvuka pri perekhode materiala iz khрупkogo v plasticheskoye sostoyaniye]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1978, vol. 239, no. 4, pp. 835–837. (Russ.).