

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД ПРИ ПЛАСТОВЫХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И ЕГО АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

*М.А. Кузнецов, А.В. Богданов, П.О. Овсянников
(ФГБОУ ВПО «ТамГТУ»),
Е.Б. Григорьев (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)*

Выполненный в [1] анализ методов и оборудования для исследования теплопроводности сухих и флюидонасыщенных горных пород показал, что наиболее приемлемыми для поставленных целей являются стационарные методы. Они предназначены для определения теплопроводности породы с погрешностью до 3 % в интервале температур 200÷500 К при давлениях более 100 МПа, что позволяет моделировать термобарические условия естественно залегания углеводородонасыщенных пластов на глубинах до 4000 м [2]. Описанное в [3] устройство реализует стационарный метод плоского слоя. Давление до 150 МПа на исследуемый образец создается в термостатированном автоклаве, заполненном передающей давление жидкостью. При этом в автоклав помещается также электрический нагреватель, создающий тепловой поток, холодильник, термодпары для измерения разности температур нагревателя и холодильника и абсолютной температуры опыта, система компенсации и измерения потерь тепла нагревателя. Это требует использования сложных устройств герметизации входящих в автоклав измерительных коммуникаций, приводит к возникновению дополнительных погрешностей из-за неконтролируемого теплопереноса через коммуникации и механического воздействия давления на материал термоэлектродов измерительных термодпар.

Также стационарный метод плоского слоя используется авторами [2, 4]. Примененное ими устройство отличается тем, что давление до 350 МПа на образец создается газом (аргоном). Использована более совершенная методика учета погрешностей измерения теплопроводности, но основные недостатки [3] сохранились. Кроме того, такой вариант требует использования сложного компрессорного оборудования и взрывоопасен.

В работе [5] для измерения коэффициента теплопроводности использовалось устройство, работающее по стационарному методу коаксиальных цилиндров. Устройство имеет недостатки двух предыдущих и, кроме того, предъявляет повышенные требования к точности изготовления контактирующих с цилиндрической поверхностью образца деталей для обеспечения хорошего теплового контакта. При несоблюдении этого условия существенно снижается точность измерения теплопроводности.

Все описанные устройства трудно реализуемы из-за необходимости поддержания высокого давления в достаточно большом объеме, трудностей учета тепловых потоков и большого количества измерительных коммуникаций, требующих их герметизации.

Предлагаемое устройство (рис. 1) предназначено для измерения теплопроводности флюидонасыщенных горных пород при поровом давлении до 100 МПа и температуре 200÷500 К с погрешностью до 3%. Оно реализует метод стационарного плоского слоя и отличается от описанных выше тем, что нагреватель 2 и холодильник 3 одновременно являются конструктивными силовыми элементами измерительного автоклава, а измерительные термомпары 6, 7 и электрический нагреватель 5 оказываются разгруженными от давления, что значительно упрощает аппаратное оформление опыта и повышает точность определения теплопроводности флюидонасыщенного под давлением пористого образца за счет снижения неконтролируемых переносов тепла и исключения влияния давления на термоЭДС измерительных термомпар. При этом давление создается только в объеме цилиндрического образца 1.

Устройство состоит из цилиндрической обечайки 4, изготовленной из нержавеющей хромоникелевой стали. Днища 2 и 3 изготавливаются из прокатной неотожженной меди и являются одновременно нагревателем и холодильником образца 1. При такой конструкции измерительной ячейки важно подобрать материалы с определенным сочетанием механических и теплофизических свойств. Обечайка 4 должна иметь низкую теплопроводность, сопоставимую с теплопроводностью флюидонасыщенной горной породы (3–12 Вт/(м·К)), чтобы как можно большая часть теплового потока от электронагревателя 5 шла не через обечайку, а через образец 1. Днища 2 и 3 должны иметь возможно большую

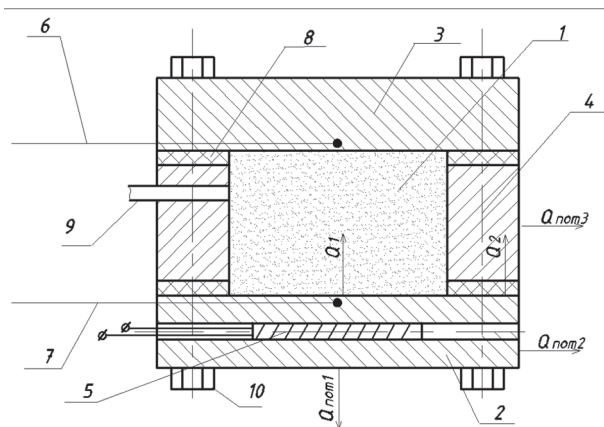


Рис. 1. Принципиальная схема устройства: 1 – образец; 2 – днище (нагреватель); 3 – днище (холодильник); 4 – цилиндрическая обечайка; 5 – электрический нагреватель; 6 – термопара холодильника; 7 – термопара нагревателя; 8 – прокладки из пластичного материала; 9 – трубка для вакуумирования и создания порового давления в образце; 10 – шпильки

теплопроводность, чтобы точно измерять температуру на торцевых поверхностях образца 1. Механические и теплофизические свойства используемых материалов представлены в таблице.

В одно из днищ в радиальное сквозное отверстие помещается электрический нагреватель 5. Для измерения температуры днища 2 (нагревателя) и днища 3 (холодильника) используются термопары 7 и 6, помещенные в радиальные глухие отверстия. В обечайку 4 вварена трубка 9, через которую образец 1 вакуумируется, а затем насыщается исследуемым флюидом под давлением P .

Устройство работает следующим образом. Между днищем и обечайками помещаются прокладки 8 из пластичного материала (отожженная медь, фторопласт и т.д.), что обеспечивает надежный тепловой контакт нагревателя 2 и холодильника 3 с образцом 1. Конструкция стягивается шпильками 10 и помещается в термостат. Теплота Q , выделяемая электрическим нагревателем 5, создает тепловые потоки:

$$Q = UI = Q_1 + Q_2 + Q_{nom1} + Q_{nom2} + Q_{nom3}, \quad (1)$$

где U – напряжение; J – сила тока; Q_1 – тепловой поток через образец 1; Q_2 – тепловой поток через обечайку 4; Q_{nom1} – осевой поток

неконтролируемых потерь тепла от нагревателя; Q_{nom2} – радиальный поток неконтролируемых потерь тепла от нагревателя; Q_{nom3} – радиальный поток неконтролируемых потерь тепла от обечайки.

Механические и теплофизические свойства используемых материалов при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Материал	Сталь12Х18Н10Т (закалка 1020–1100 °С, охлаждение – воздух) [6]	Деформированная медь МЗ [7]	Отожженная медь МЗ (отжиг 850–900 °С, охлаждение – воздух) [7]
Свойство			
Предел прочности σ_s , МПа	510	340–450	220–245
Предел текучести σ_m , МПа	196	380	70
Модуль упругости E , ГПа	198	115	115
Твердость НВ 10^{-1} , МПа	179	120	40
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · К)	15	390	390
Удельная теплоемкость C , Дж/(кг · К)	462 (при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	385	385
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	16,6	16,8	16,8
Ударная вязкость КСУ, Дж/ cm^2	286	–	500–550
Коэффициент Пуассона	0,28	0,32–0,35	0,32–0,35

Для учета тепловых потоков Q_2 , Q_{nom1} , Q_{nom2} и Q_{nom3} предварительно выполняют тарировку устройства без образца I при температуре от 200 до 500 К и фиксированной разности температур нагревателя и холодильника $T_1 - T_2$. При этом полость для образца I вакуумируется через трубку 9 , а ее внутренние поверхности предварительно полируются. Таким образом, тепло в полости I не передается ни теплопроводностью, ни конвекцией, ни излучением, т.е. $Q_1 = 0$, и характер зависимости $Q_0 = F(T)$ определяется только изменением теплопроводностей материала обечайки 4

и теплоизолирующего материала вокруг устройства в рабочем температурном интервале от 200 до 500 К.

Температура опыта:

$$T = T_{\text{терм.}} + \frac{T_1 - T_2}{2}, \quad (2)$$

где $Q_0 = U_0 I_0 = Q_2 + Q_{\text{ном1}} + Q_{\text{ном2}} + Q_{\text{ном3}}$ – количество тепла, необходимого в опыте без образца для поддержания фиксированной разности $T_1 - T_2$ для текущей T ; $T_{\text{терм}}$ – температура в термостате; T_1 – температура нагревателя, измеренная термопарой 7; T_2 – температура холодильника, измеренная термопарой 6.

После определения зависимости $Q_0 = F(T)$ в устройство помещается образец 1, через который устанавливается тепловой поток Q_1 . Это приводит к охлаждению нагревателя 2 и нагреву холодильника 3. Следовательно, для поддержания фиксированной разности $T_1 - T_2$ к электрическому нагревателю 5 необходимо подвести дополнительно:

$$Q_1 = Q - Q_0 = UI - U_0 I_0. \quad (3)$$

Тогда для текущей T и порового давления P получаем рабочую формулу:

$$\lambda = \frac{(UI - U_0 I_0) l}{(T_1 - T_2) S}, \quad (4)$$

где l – длина образца 1, м; S – площадь поперечного сечения образца, м²; λ – теплопроводность образца, Вт/м · К.

Устройство рассчитано на прочность для образца породы диаметром $d = 30$ мм и длиной $l = 20$ мм, изготовленного из бурового керна.

Аппаратурное оформление рассмотренного метода и реализующего его устройства представлено на рис. 2.

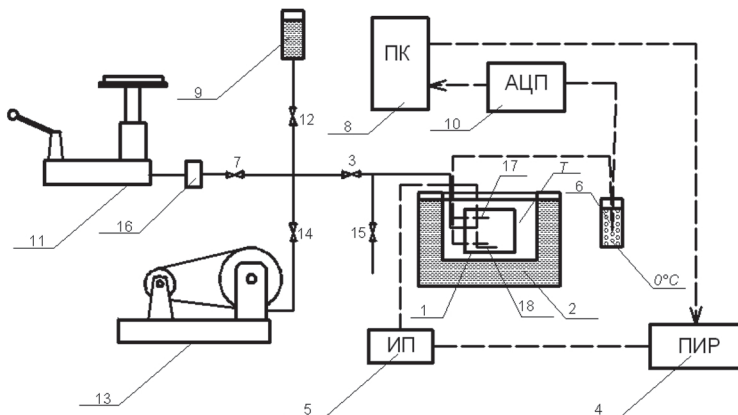


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – измерительная ячейка; 2 – жидкостной термостат с температурой T ; 3, 7, 12, 14 – вентили; 4 – регулятор величины $T_1 - T_2$; 5 – источник питания градиентного нагревателя; 6 – сосуд Дьюара с тающим льдом; 8 – персональный компьютер; 9 – сосуд для заполнения измерительной ячейки флюидом, жидким при ну; 10 – аналогоцифровой преобразователь сигнала терморпар; 11 – пресс грузопоршневого манометра; 13 – вакуумный насос; 15 – отвод для заполнения измерительной ячейки флюидом, газообразным при ну; 16 – разделитель давления; 17 – терморпары измерительной ячейки; 18 – градиентный нагреватель измерительной ячейки

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-08-00094-а).

Список литературы

1. Кузнецов М.А. Состояние теплофизических исследований пластовых систем / М.А. Кузнецов, П.О. Овсянников, Е.Б. Григорьев // Вести газовой науки. Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. – Ч. 2. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – С. 69–82.
2. Эмиров С.Н. Теплопроводность песчаников в условиях высоких давлений и температур / С.Н. Эмиров, Э.Н. Рамазанова // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. – № 2. – С. 1–4.
3. Курбанов А.А. Теплопроводность газо-, водо- и нефтенасыщенных горных пород в условиях моделирующих глубинные залегающие пластов // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1988. – С. 107–112.

4. Эмиров С.Н. Экспериментальное исследование теплопроводности полупроводников и горных пород при высоких давлениях и температурах: дис. д-ра техн. наук / С.Н Эмиров. – Махачкала, 1997. – 306 с.

5. Масленников А.И. Исследование влияния давления и температуры на теплопроводность горных пород (сухих, водо и нефтенасыщенных): дис. канд. тех. наук / А.И. Масленников. – М, 1977. – 127 с.

6. ООО Инженерный союз. Электронный ресурс. <http://www.12821-80.ru/style12X18H10T.php>

7. ООО «Мелита». Электронный ресурс. http://melita.com.ua/spravochnik_med.html