EAGE Geomodel-2017

Submission ID: 43797

Investigation of Coefficient of Linear Thermal Expansion of Bazhenov Formation Rocks

A.V. Gabova* (Skolkovo Institute of Science and Technology), E.M. Chekhonin (Skolkovo Institute of Science and Technology), E.Y. Popov (Skolkovo Institute of Science and Technology), E.G. Savelev (Skolkovo Institute of Science and Technology), Y.A. Popov (Skolkovo Institute of Science and Technology), E.V. Kozlova (Skolkovo Institute of Science and Technology), I.A. Karpov (LLC Gazpromneft Scientific and Technical Center)

SUMMARY

Despite the importance of experimental data on coefficient of linear thermal expansion (CLTE) for geomechanical study of the Bazhenov formation (BF) rocks the literature on such data is practically absent. Differential CLTE values of BF rock samples and their variations within wide temperature intervals were determined including the degree of CLTE anisotropy with the equipment specially adapted for CLTE measurements on standard core samples. It was established that the values of CLTE of BF rocks exceed significantly (by hundreds percent) the typical values of CLTE of sedimentary rocks. It was shown that the CLTE of BF rocks has high degree of anisotropy and irregular behavior at elevated temperatures (up to 300°C), that can be related to different values of total organic carbon in BF rock samples. For the same series of rock samples thermal conductivity, that is sensitive indicator of changes in rock condition, was measured before and after heating the samples. Results showed that thermal conductivity of rock samples did not change after heating. It was established that the directions of main thermal conductivity and CLTE axes coincide practically.

Исследования температурного коэффициента линейного расширения пород баженовской свиты

А.В. Габова*, Е.М. Чехонин, Е.Ю. Попов, Е.Г. Савельев, Е.В. Козлова, Ю.А. Попов (Сколковский институт науки и технологий), И.А. Карпов (ООО «Газпромнефть НТЦ»)

Введение

Структура пустотного пространства пород баженовской свиты (БС) изменяется как в процессе созревания керогена, так и в процессе добычи с использованием теплового воздействия на пласт. Полноценное моделирование изменения структуры порового пространства наряду с оценкой термической составляющей напряжений в пласте нуждается в представительной информации о важном, но малоизученным свойстве пород БС – температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР). Различные коэффициенты теплового расширения матрицы/скелета породы и керогена могут являться одной из причин возникновения аномально высоких пластовых давлений (АВПД) в замкнутой системе, что нередко наблюдается в БС. На величину теплового расширения оказывают влияние минеральный состав, структура, пористость, свойства флюида в порах, микротрещины, давление и температура (Siegesmund and Weiss, 1992). Нагрев горных пород, особенно в условиях увеличения напряжений, как правило, приводит к изменениям (зачастую необратимым) в структуре и физических свойствах пород (Somerton, 1992). Типичные значения ТКЛР горных пород лежат в относительно узком диапазоне по сравнению с их составляющими: битум – $200 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} (Ярцев и Ерофеев, 2014), кероген – $115 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} (Kaevand and Lille, 2005), минералы – $(16 \div 50) \cdot 10^{-6}$ K^{-1} (Anderson, 1989), глинистые минералы, перпендикулярно напластованию – $(10 \div 19) \cdot 10^{-6}$ K^{-1}, глинистые минералы, параллельно напластованию – $(3{,}5 \div 12) \cdot 10^{-6}$ K^{-1} (McKinstry, 1965). Важно, что по опубликованным данным (Gilliam and Morgan, 1987) ТКЛР сланцев существенно (примерно в 3-5 раз) отличается от ТКЛР других осадочных горных пород и характеризуется сложным поведением при повышенных температурах. При этом объем экспериментальных данных по ТКЛР в открытой литературе чрезвычайно мал для сланцев, и практически отсутствует для пород БС. Публикуются, как правило, средние значения ТКЛР для широких температурных диапазонов, а не дифференциальные (привязанные к определенной температуре) значения, более информативные и удобные для практического использования. В то же время именно дифференциальные значения демонстрируют сложный характер вариаций ТКЛР с температурой, как это видно из зависимости на рисунке 1, построенной нами по общим данным о расширении образцов с температурой, опубликованным в (Gilliam and Morgan, 1987).

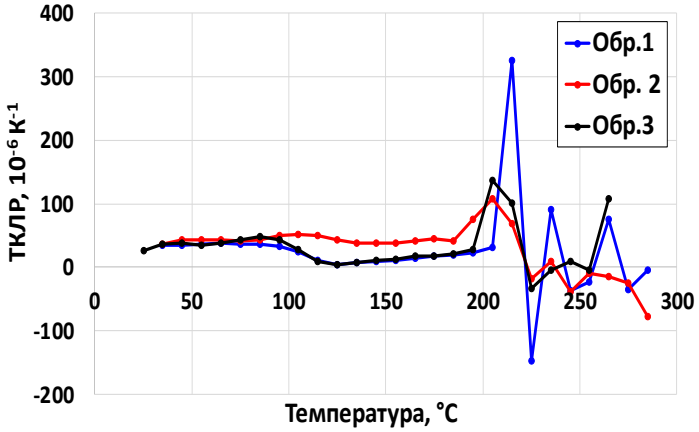


Рисунок 1 *Зависимость дифференциального ТКЛР пород сланцев от температуры, построенная по данным (Gilliam and Morgan, 1987).*

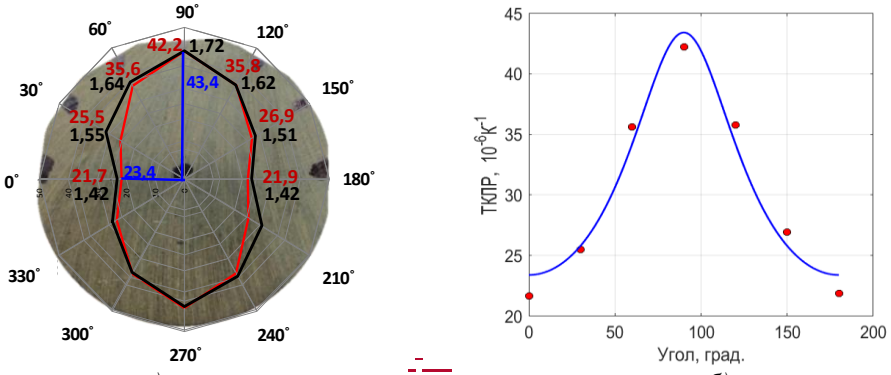
Кроме того, изучение анизотропии ТКЛР ранее проводилось только для некоторых типов горных пород и, как правило, только для трех взаимно перпендикулярных заранее выбранных направлений без определения направлений главных осей ТКЛР (Luque et al. 2011). Публикаций с определением главных осей ТКЛР сланцев практически не найдено.

Аппаратура

Измерения ТКЛР образцов БС проводились нами на кварцевом дилатометре ДКТ-40, специально адаптированном для исследований образцов стандартного керна размером 30×30 мм (Попов и др. 2008). Принцип измерений заключается в определении удлинения образца при нагреве от комнатной до требуемой температуры с последующим расчетом среднего ТКЛР в этом интервале температур. Применение высокочувствительных датчиков деформации позволило достичь высокого разрешения (~0,01 мкм) при измерениях удлинения образца при нагреве. Установка обеспечивает возможность измерений ТКЛР (погрешность измерений не более 4%) на образцах стандартного керна (включая исследования анизотропии ТКЛР) без какой-либо их механической обработки и с обеспечением их полной сохранности. Возможны измерения ТКЛР при задании температурного возмущения не более чем 20-25 ˚С со смещением данного интервала температурного возмущения в интервале 25-300 ˚С, что обеспечивает возможность измерений дифференциальных значений и вариаций ТКЛР в широких температурных интервалах. Методика измерений соответствовала основным требованиям методических рекомендаций по дилатометрии.

Изучение анизотропии ТКЛР

На шести цилиндрических образцах БС с территории Нижневартовского свода, выпиленных в направлении напластования перпендикулярно оси полноразмерного керна, были проведены измерения ТКЛР с целью анализа степени анизотропии ТКЛР. Каждый образец располагался в двух взаимно перпендикулярных положениях (с вертикальной и горизонтальной осью цилиндра). При вертикальном направлении оси цилиндра ТКЛР измеряли один раз – параллельно напластованию (аксиальное направление). При горизонтальном направлении оси цилиндра измеряли ТКЛР перпендикулярно напластованию (радиальное направление, 7 раз – каждый раз с поворотом цилиндра на 30˚ (рисунок 2а)). Для тех же образцов методом оптического сканирования (Попов и др. 2017) проводились измерения теплопроводности при сканировании образцов для тех же 7 направлений, сдвигаемых каждый раз на 30˚. На рисунке 2а представлен пример результатов измерений ТКЛР и теплопроводности образца БС в радиальном направлении через каждые 30˚. Определение направления главных осей и главных значений ТКЛР проводилось путем наложения эллипса с неизвестными величинами полуосей и неизвестным углом поворота на экспериментальные результаты и определения неизвестных величин методом наименьших квадратов. На рисунке 2б показан результат решения оптимизационной задачи по методу нахождения параметров эллипса (синяя линяя); красными маркерами показаны результаты измерений. Вариации значений ТКЛР для 6 образцов БС для направления вдоль напластования пород составили (14,9÷26,0)·10^{-6} K^{-1}, для направления перпендикулярно напластованию – (18,5÷54,2)·10^{-6} K^{-1}.



а) *б)*

Рисунок 2 *Результаты измерений ТКЛР (красные линии и цифры) и теплопроводности (черные линии и цифры) образца БС в радиальном направлении при горизонтальном направлении оси цилиндра. Результаты ТКЛР представлены в единицах измерения 10^{-6} K^{-1}, результаты теплопроводности – в Вт/(м·К). Синими линиями показан результат восстановления полуосей эллипса ($ТКЛР_a$ = 43,4·10^{-6} K^{-1}, $ТКЛР_b$ = 23,4·10^{-6} K^{-1}).*

Было обнаружено, что образцы БС обладают высокой анизотропией ТКЛР – 1,2÷2,2. Вариации коэффициента теплопроводности составили 1.42÷1.72 Вт/(м·К), диапазон коэффициента анизотропии теплопроводности – 1.10÷1.22; при этом направления главных осей теплопроводности практически совпали с направлениями главных осей ТКЛР. Причиной значительных вариций ТКЛР в серии изучавшихся образцов БС может являться различное содержание органического углерода ($C_{орг}$), определявшегося для тех же образцов с помощью пиролизатора. На рисунке 3 представлена зависимость ТКЛР образцов БС от содержания $C_{орг}$.

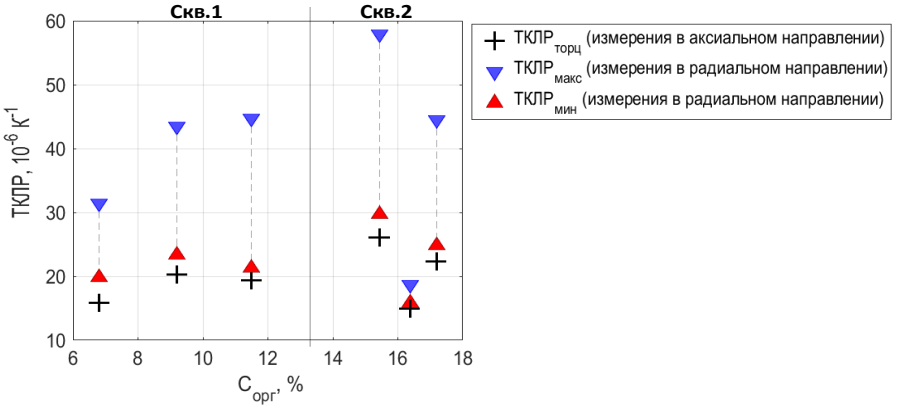


Рисунок 3 *Сопоставление результатов измерения ТКЛР образцов БС (в радиальном и аксиальном направлениях) с общим содержанием органического углерода ($C_{орг}$).*

Зависимость ТКЛР от температуры

Для девяти образцов БС были проведены измерения ТКЛР при изменениях температуры в диапазоне 25-300 ˚С. На рисунке 4 представлены зависимости относительного изменения дифференциального ТКЛР (т.е. по отношению к значению ТКЛР при 25 ˚С) от температуры для направлений параллельно и перпендикулярно напластованию для всех изучавшихся образцов. При повышенных температурах ТКЛР образцов БС обладает нестабильным характером вариаций, что подтверждает характер поведения ТКЛР сланцев, опубликованный ранее (рисунок 1). После завершения измерений ТКЛР при повышенных температурах была заново измерена теплопроводность образцов БС для двух установленных направлений главных осей теплопроводности – параллельно и перпендикулярно напластованию. Важно отметить, что теплопроводность, которая является чувствительным индикатором изменения состояния образцов пород после различных воздействий (Попов и др. 2017), почти не изменилась. Установлено, что после нагрева теплопроводность 6-ти образцов параллельно напластованию изменилась в среднем на 0,4%, а перпендикулярно напластованию для 5-ти образцов – на 0,7,%, т.е. в пределах погрешности измерений (±3% при доверительной вероятности 0,95). Лишь для 1-го образца теплопроводность перпендикулярно напластованию значимо уменьшилась – на 10%.

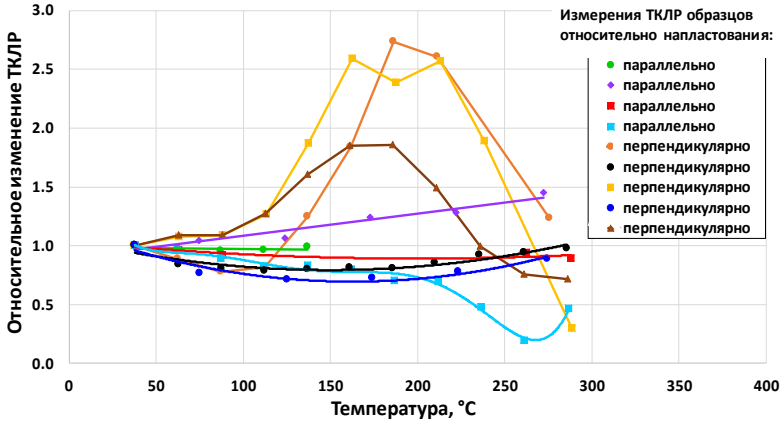


Рисунок 4 *Относительные изменения главных значений тензора ТКЛР образцов БС для двух главных осей ТКЛР (параллельно и перпендикулярно напластованию) с температурой.*

Выводы

Специально адаптированная аппаратура для исследований образцов стандартного керна позволила определить дифференциальный ТКЛР пород БС и его вариации в широком температурном интервале. Полученные экспериментальные данные о ТКЛР образцов пород БС показывают, что ТКЛР характеризуется существенной анизотропией и значительными вариациями значений в рамках серии изучавшихся образцов. Установлены совпадения направлений главных осей ТКЛР и теплопроводности. Измеренные значения ТКЛР образцов пород БС в диапазоне температур 25-50 ˚С существенно выше значений ТКЛР карбонатных пород, известняков и в большинстве случаев превышает опубликованные значения ТКЛР глинистых минералов. В то же время, измеренные значения ТКЛР меньше опубликованных значений ТКЛР битума и керогена некоторых нефтяных сланцев. Зависимость ТКЛР от температуры для кажого из образцов различна, что может быть связано с различным содержанием органического вещества в образцах. ТКЛР образцов БС обладает значительными вариациями при повышенных температурах, что подтверждает ранее опубликованные данные для пород сланцев. Измерения теплопроводности образцов БС до и после измерений ТКЛР при повышенных температурах показали, что теплопроводность образцов после нагрева почти не изменилась. Получение достоверной информации о ТКЛР пород БС не может быть обеспечено на основе литературных данных и требует продолжения экспериментальных исследований ТКЛР на отобранных коллекциях керна при помощи современной аппаратуры.

Литература

Попов, Е.Ю., Ромушкевич, Р.А. и Попов, Ю.А. [2017] Измерение тепловых свойств пород на стандартном керне как необходимый этап теплофизических исследований месторождений углеводородов. *Геология и разведка*, **2**, 56-70.

Попов, Ю.А., Миклашевский, Д. Е., Вертоградский, В.А., Шувалов, В.И., Коробков, Д.А. и Лазаренко, А.П. [2008] Совершенствование аппаратурно-методической базы для измерений температурного коэффициента линейного расширения минералов и пород. *Геология и разведка*, **6**, 63-68.

Ярцев, В.П. и Ерофеев, А.В. [2014] Эксплуатационные свойства и долговечность битумно-полимерных композитов. *ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*, 7-8.

References

Popov, E.Y., Romushkevich, R.A. and Popov, Y.A. [2017] Measurement of thermal properties on standard core samples as necessary step for thermophysical investigation of hydrocarbon reservoirs. *Geology and Exploration*, **2**, 56-70.

Popov, Y.A., Miklashevsky, D.E., Vertogradsky, V.A., Shuvalov, V.I., Korobkov, D.A. and Lazarenko, A.P. [2008] Development of the instrumental and methodological base for measuring the coefficient of linear thermal expansion of minerals and rocks. *Geology and Exploration*, **6**, 63-68.

Yarzev, V.P. and Erofeev, A.V. [2014] Operating properties and durability of bitumen-polymer composites. FGBOU VPO, *«TGTU»*, 7-8.

Anderson, Don L. [1989] *Theory of the Earth.* Boston: Blackwell Scientific Publications, 80-81.

Gilliam, T.M. and Morgan, I.L. [1987] *Shale: Measurement of thermal properties.* Oak Ridge National Laboratory, United States.

Kaevand, T. and Lille, U. [2005] Atomistic molecular simulation of thermal volume expansion of Estonian Kukersite kerogen. *Oil Shale*, **22**(3), 291-303.

Luque, A., Leiss, B., Alvarez-Lloret, P., Cultrone, G., Siegesmund, S., Sebastian, E. and Cardell, C. [2011]. Potential thermal expansion of calcitic and dolomitic marbles from Andalusia (Spain). *J. Appl.Cryst*., **44**, 1227-1237.

McKinstry, H.A. [1965] Thermal expansion of clay minerals. *The American mineralogist*, **50**, 212-222.

Siegesmund, S. and Weiss, T. [1992] Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. Int J Earth Sci, **89**(1), 170-182.

Somerton, W.H. [1992] Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems. Developments in petroleum science, 257-260.