

УДК 552.578.1:536

**Э.А. Гарушев**, к.т.н., главный специалист; **А.В. Коробкин**, ведущий специалист, e-mail: avkorobkin@rn-ntc.ru; **А.А. Рогозин**, ведущий специалист, ООО «НК «Роснефть-НТЦ»; **А.А. Кузнецов**, ведущий специалист, ООО «РН-СахалинНИПИморнефть»

# ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К ПЛАСТОВЫМ

## LABORATORY ESTIMATION OF ROCKS' THERMAL PROPERTIES UNDER CLOSE TO IN-SITU CONDITIONS

*E.A. Garushev, A.V. Korobkin, A.A. Rogozin, OJSC «Oil company «Rosneft-NTC»; A.A. Kuznetsov, LLC «RN-Sakhalin NIPI-Morneft»*

*Nowadays the increasing interest is aroused towards thermal drive methods for hard-to-recover oil reserves. The engineering calculations involving experimentally determined heat conductivity values shall provide the basis for thermal drive methods. Application of theoretical and empirical heat conductivity values can result in serious thermal drive calculation errors. The accuracy in heat conductivity measurement is substantially dependent on measuring procedure and plant design. This paper is devoted to theoretical assumptions in heat conductivity calculations and discusses possibilities of their application at Autolab 1500 plant in thermobaric conditions equivalent to in-situ conditions*

*Keywords: rock formation, heat conductivity, acoustic waves, formation matrix, interstitial space.*

Точное знание термических характеристик горных пород, таких как теплоемкость, температуропроводность и особенно теплопроводность, является определяющим при проектировании и реализации тепловых методов извлечения высоковязких нефтей. Одним из основных недостатков существующих методик является отсутствие достаточно надежных средств измерения тепловых характеристик горных пород в пластовых условиях.

В основе предлагаемого метода лежит лабораторное определение теплопроводности горных пород по измеренным значениям акустических свойств на установке AutoLab 1500 (рис. 1), поскольку тепловые свойства породы, как и акустические, определяются

структурными особенностями и минеральным составом скелета, емкостными и фильтрационными свойствами породы. Суть метода заключается в измерении скорости продольных и поперечных звуковых волн на цилиндрических образцах горной породы (керна) в пластовых условиях, по значениям которых рассчитываются значения теплопроводности.

При обосновании метода керн рассматривался как пористый упругий континуум, в котором все звуковые волны распространяются с одной и той же скоростью, независимо от длины волны. Поры можно отнести к трехмерным статическим дефектам, которые создают добавочное решеточное теплопроводности, пропорциональное

концентрации этих дефектов [2, 3]. Решеточное тепловое сопротивление вызвано рассеянием звуковых волн на дефектах кристаллической решетки, обусловленных случайным скреплением границ кристаллических зерен, и, естественно, главный вклад в это сопротивление дают трехфононные процессы рассеяния на этих границах. При пластовых температурах можно считать решеточное тепловое сопротивление основным вкладом в составляющую теплопроводности, имеющим вид:

$$\frac{1}{\lambda_g} = W_{ph-ph} = AT, \quad (1)$$

где  $\lambda_g$  – величина, обратная теплопроводности;  $W_{ph-ph}$  – тепловое сопротивление

ние; А – приборный коэффициент; Т – температура.

Определить коэффициент А можно в лабораторных условиях, измеряя непосредственно или косвенно неизвестные параметры, входящие в уравнение:

$$W_{ph-ph} = \frac{9\alpha\gamma T}{V_m C_v a'} \quad (2)$$

где

$\alpha$  – коэффициент линейного термического расширения;  $V_m$  – скорость распространения звука;  $C_v$  – теплоемкость при постоянном объеме;  $a$  – средняя длина свободного пробега фононов, равная среднему размеру зерна пористой среды (100–1000 мкм);  $\gamma$  – параметр Грюнайзена, который характеризует изменение температуры тела при адиабатическом изменении объема.

Путем измерения скорости звуковых волн на установке AutoLab 1500с точностью не менее 4 м/с, нами была установлена связь параметра Грюнайзена  $\gamma$  с коэффициентом Пуассона  $\mu$ :

$$\gamma = B \left( \frac{1+\mu}{1-2\mu} \right) \quad (3)$$

Множитель В является постоянной величиной для пористых твердых тел. Он имеет физический смысл величины, обратной области локализации энергии D, запасаемой деформируемым телом  $B = D^{-f}$ , где  $f$  – фрактальная размерность этой области, принимающая значения от 2 до 3 в зависимости от пористости среды.

Параметр Грюнайзена является важной характеристикой, входящей в уравнение состояния твердого тела, выражает нелинейность силы межатомного взаимодействия и ангармонизм колебаний кристаллической решетки [1]. Установлено, что отношение скоростей продольных  $v_p$  и поперечных  $v_s$  акустических волн является функцией параметра Грюнайзена пористых твердых тел. Причиной связи между акустическим параметром Грюнайзена и коэффициентом Пуассона служит их зависимость от тангенциальной и нормальной жесткости скелета пористого тела.

По результатам проведенных экспериментов с пористыми образцами керна



Рис. 1. Установка для измерения звуковых волн AutoLab 1500

горных пород в пластовых условиях установлена линейная корреляция между параметром Грюнайзена и отношением продольной  $v_p$  и поперечной  $v_s$  скорости звука:

$$\gamma = \frac{9(v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2)}{2(v_p^2 + 2v_s^2)} \quad (4)$$

Поперечные волны в жидких средах практически не распространяются, и для них параметр Грюнайзена будет равен 4,5. Параметр открытой пористости для таких сред равен единице. При стремлении пористости к нулю пара-

метр Грюнайзена стремится к значениям скелета породы и может принимать значения от 0,85 до 3,53.

Таким образом, измеряя скорости продольных и поперечных звуковых волн в керне в пластовых условиях, мы путем косвенных вычислений можем определять параметр теплопроводности исследуемого образца керна. С помощью данного метода были проведены исследования более чем на 100 образцах горных пород. Образцы керна были отобраны из различных месторождений Восточной и Западной Сибири и о. Сахалин.

### Зависимость параметра Грюнайзена от пористости

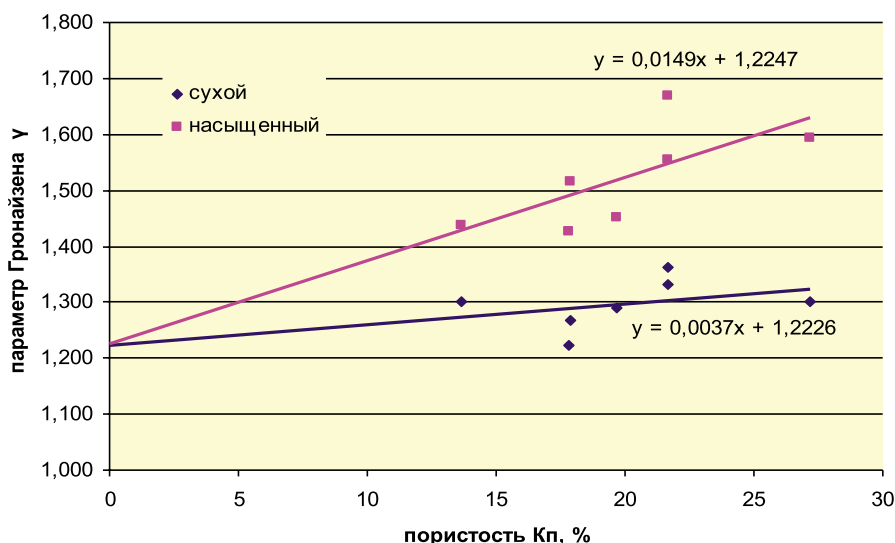
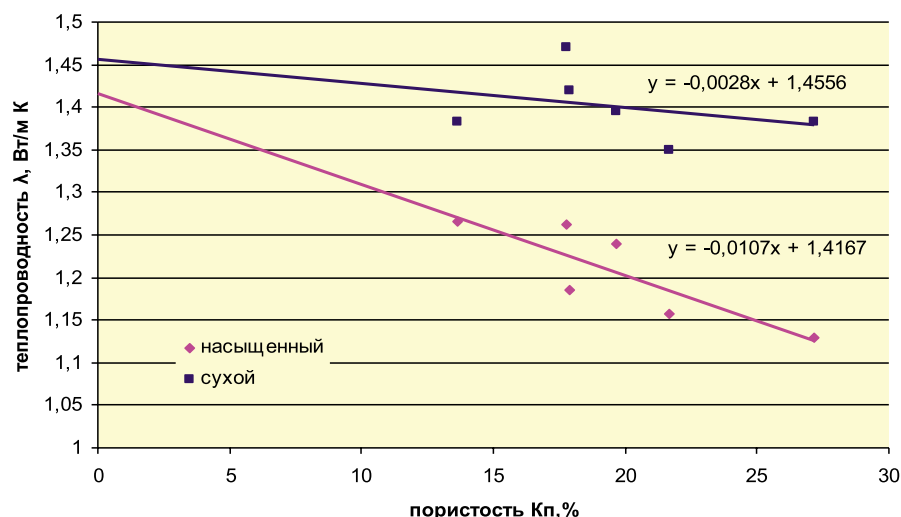


Рис. 2. Зависимость параметра Грюнайзена от насыщенности пор керна

### Зависимость теплопроводности зерна от пористости



**Рис. 3. Зависимость теплопроводности сухого и насыщенного пластовой водой зерна от пористости**

На основании полученных данных для одного из нижнемеловых пластов месторождения Западной Сибири построены зависимости параметра Грюнайзена для сухих пористых образцов (нижняя линия) и 100% насыщенных (верхняя линия) от пористости породы (рис. 2). Из рисунка видно, что с уменьшением пористости вклад насыщающей жидкости в ангармонизм колебаний решетки падает, и наоборот: чем больше объем пор, тем больше вклад жидкости в колебательный процесс за счет теплового движения, которое расстраивает синхронизацию колебаний твердого скелета пористого зерна. Пористость исследуемых зерен составляла от 14 до 28%. Путем аппроксимации линии тренда на ось  $y$ , что соответствовало значению пористости равной 0%, получили значение параметра Грюнайзена, равное 1,223. Это значение практически совпадает с результатами, полученными путем

проведения лабораторных измерений скорости продольных и поперечных звуковых волн на эталонном цилиндрическом образце из плавленого кварца ( $\gamma=1,232$ ). Известно, что величина скорости звука связана с модулем упругости и коэффициентом Пуассона, которые характеризуют распространение упругих возмущений в твердом теле и определяют прочность межатомных связей. Тепловые фононы, отвечающие за теплопроводность, представляют собой такие возмущения. Они распространяются в твердом теле со скоростью звука и очень сильно рассеиваются дефектами в виде пор, что приводит к удлинению пути прохождения звука от одной грани образца до другой. Нами получены результаты зависимости теплопроводности сухого и насыщенного пластовой водой зерна в термобарических условиях (рис. 3). Аппроксимация линии тренда теплопроводности для

сухого зерна дает значение теплопроводности равное 1,417Вт/мК, которое согласуется со значением теплопроводности эталонного плавленого кварца, равным 1,463Вт/мК. Из рисунка видно, что вода оказывает значительное влияние на снижение теплопроводности зерна в пластовых условиях. Изменение теплопроводности  $\lambda$  сухих и насыщенных песчаников, карбонатных коллекторов в зависимости от пористости  $K_p$  можно представить следующим уравнением:

$$\lambda = \lambda_T(1 - CK_p), \quad (5)$$

где  $\lambda_T$  – значение теплопроводности твердой фазы исследуемого зерна;  $C$  – коэффициент, определяемый типом исследуемого зерна.

### ВЫВОДЫ:

1. Разработана новая методика косвенного определения теплофизических свойств горных пород. Суть данного метода заключается в измерении скорости продольных и поперечных звуковых волн, которые являются однозначной функцией коэффициента Пуассона и имеют тесную связь с параметром Грюнайзена.
2. С помощью данного метода измерения теплопроводности осадочных пород-коллекторов осуществляются в термобарических условиях на сухих и насыщенных образцах, которые в большинстве случаев существенно различаются. Способ позволяет с высокой степенью точности получать информацию о тепловых свойствах пористого и трещиноватого коллектора в условиях, соответствующих пластовым условиям исследуемого месторождения.

### Литература:

1. Беломестных В.Н., Теслева Е.П., Соболева Э.Г. Максимальный параметр Грюнайзена при полиморфных превращениях в кристаллах // ЖТФ. – 2009. – т. 79. – вып. 2. – С. 153–154.
2. Липаев А.А., Хисамов Р.С., Чугунов В.А. Теплофизика горных пород нефтяных месторождений. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 304 с.
3. Теплопроводность твердых тел: Справочник / Охотин А.С., Боровикова Р.П., Нечаева Т.В., Пушкарский А.С. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

**Ключевые слова:** горные породы, теплопроводность, акустические волны, скелет породы, поровое пространство.

# Новый уровень энергоэффективности



Насосно-компрессорные трубы с высокогерметичным резьбовым соединением TMK FMT для газовых и нефтяных скважин с высоким газовым фактором и работы в H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub> среде.

Обсадные трубы с высокогерметичным резьбовым соединением TMK PF ET для газовых и нефтяных скважин, 100% эффективность на растяжение и сжатие, применимы для спуска обсадных колонн с вращением верхним приводом и бурения на обсадной колонне.

Высокопрочные бурильные трубы с высокомоментным замком TMK TDS и увеличенным циркуляционным каналом, совместимы с трубами по API, ГОСТ и применимы для бурения скважин с S-образным профилем.

Комплексное применение высокотехнологичных труб TMK способно увеличить энергоэффективность при освоении месторождений на **25–30%**



ЗАО «Торговый Дом «ТМК»  
105062, Россия, Москва, ул. Покровка, д.40, стр. 2а  
тел.: +7 495 775-7600, факс: +7 495 775-7601  
E-mail: [tmk@tmk-group.com](mailto:tmk@tmk-group.com)  
[www.tmk-group.ru](http://www.tmk-group.ru)

TMK-Премиум Сервис  
105064, Россия, Москва, М. Казенный пер., д. 3,  
Бизнес-центр «Покровский Двор»  
тел.: +7 495 411-5353, факс: +7 495 411-5363  
E-mail: [premium@tmk-group.com](mailto:premium@tmk-group.com)