Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже Schlumberger Moscow Research Center

Теплофизический анализ керна Thermal core analysis

Попов Ю.А.

профессор, д.ф.-.м.н., засл. деятель науки РФ

Prof. Yury Popov

Тепловые свойства пород и их роль в термодинамике пласта **Rock thermal properties and their role in reservoir thermodynamics**

Теплопроводность λ (TC), Вт.м⁻¹·K⁻¹ ٠

Thermal conductivity, W·m⁻¹·K⁻¹

٠

Тепловой поток в пласт, тепловые потери из пласта, глубинный тепловой поток в горном массиве

Heat flow and heat losses in reservoir and formation

Температуропроводность *а (TD)*, м²·с⁻¹ ٠ Thermal diffusivity. m²·s⁻¹ Динамика разогрева и охлаждения пласта Dynamics of heating and cooling reservoir and formation

Объемная теплоемкость с·р (VHC), Дж·м-3·К-1 Volumetric heat capacity, J·m⁻³·K⁻¹ Энергоемкость пласта, ключ к определению энтальпии Н Energy capacity in reservoir and formation, key to enthalpy H determination

- $\Lambda \Omega$ λU
- Температурный коэффициент линейного расширения k (ТКЛР), K⁻¹ ٠

Coefficient of linear thermal expansion

Изменение объема, внутреннее напряжение массива. разрушение пород. изменение порового пространства

Thermal expansion of rocks, internal stress in formation

$$\vec{q} = -\lambda \cdot gradT$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T + \frac{q_{\nu}}{c\rho} \qquad a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

$$c \rho = \frac{\Delta Q}{V \cdot \Delta T}; \ (c \rho)_p = (\frac{\partial H}{\partial T})_p$$

$$\Delta l = l_0 \cdot [1 + k(T - T_0)]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T + \frac{q_v}{c\rho}$$

$$a = a\Delta T + \frac{q_v}{c\rho}$$
 $a = \frac{\lambda}{c\rho}$

Основные факторы, определяющие тепловые свойства горных пород Basic factors determining rock thermal properties

- Минеральный состав Mineralogical composition
- Состав и свойства межзернового цемента Composition and properties of intergrain cement
- Пористость Porosity
- Геометрия порово-трещиноватого пространства Geometry of pore-fracture space
- Вид порозаполняющего флюида Type of pore filling fluid
- Температура и давление пласта Temperature and pressure in reservoir









Роль тепловой петрофизики в фундаментальных и прикладных науках о Земле

Role of thermal petrophysics in basic and applied Earth's sciences

ДОБЫЧА НЕФТИ И ГАЗА OIL AND GAS PRODUCTION

Проектирование методов добычи с термическим воздействием на пласт

Design of thermal EOR methods

Моделирование процессов тепло- и массопереноса в скважине и пласте

Modeling heat and mass transfer in well bore and reservoir

Интерпретация данных термометрии Interpretation of temperature logging data

Оценка напряженного состояния околоскважинного пространства Estimates of stress in wellbore proximity

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ BASIC RESEARCH

Определение плотности теплового потока в коре Heat flow density determination

Изучение процессов тепло- и массопереноса в недрах Heat and mass transfer in crust

РАЗВИВАЮЩИЕСЯ ОБЛАСТИ DEVELOPING AREAS

Добыча геотермальной энергии Geothermal energy production

Добыча газогидратов

Gas-hydrate production

Захоронение радиоактивных отходов

Nuclear waste disposal

Возможные подходы к определению тепловых свойств Possible approaches to rock thermal property determination



Теоретическое моделирование теплопроводности пород Theoretical modeling of rock thermal conductivity



Теоретические EMT- модели теплопроводности горных пород EMT - Theoretical Model of Rock Thermal Conductivity

(Bayuk et al., M&PS, 6 (39), 2004)

 $λ^* = ψ$ (пористость; минеральный состав; форма, ориентация и связность компонент) $λ^* = ψ$ (porosity; mineral composition; shape, orientation and connectivity of components)



Неопределенность в тепловых свойствах в гидродинамических симуляторах

Uncertainty in thermal property specification in reservoir simulators

- Теплопроводность матрицы пород...... 25-30% Rock matrix TC
- Выбор теоретической модели теплопроводности пород...100-400% Choice of theoretical rock TC model
- Зависимость теплопроводности от температуры...... 60-70% TC vs Temperature dependence

- Зависимость объемной теплоемкости от температуры......50-60%
 Volumetric heat capacity vs Temperature dependence

Неопределенности в тепловых свойствах в ГД - симуляторах Uncertainties in reservoir properties in HD - simulators



Ошибки в оценке добычи из-за неопределенности данных о тепловых свойствах резервуара Errors in oil recovery estimates from

uncertainties in reservoir thermal properties

Texнология парогравитационного дренажа Steam-assisted gravity drainage (SAGD)



Выводы Conclusions

- Ошибки в НДН при моделировании до 45% COP errors reach 45%
- •Теплопроводность пласта ключевой параметр TC of the reservoir is crucial value
- Максимальные последствия в течение первых лет
 - Max impact is reached during first years



Недостатки традиционных методов измерений Shortcomings of traditional methods of measurements

- Невозможность измерений на стандартном керне Impossibility to measure on core plugs
- Невозможность измерений на полноразмерном керне Impossibility to measure on full size cores
- Полировка поверхности образцов пород Polishing rock sample surface
- Проблемы с измерениями объемной теплоемкости Problems with volumetric heat capacity measurements
- Разрушение флюидонасыщенных пород Destruction of fluid-saturated sedimentary rocks
- Проблемы учета анизотропии и неоднородности в масштабах образца и разреза
 Problems with accounting for anisotropy and heterogeneity within core and formation scale



Технология оптического сканирования – ключ к высокоточным безконтактным неразрушающим TC&TD измерениям на керне Optical scanning technique as key to high precision non-contact non-destructive TC&TD measurements on cores



Качественно новые возможности для петротепловых исследований Qualitatively new possibilities for petrothermal investigations



Приборы оптического сканирования для лабораторных измерений Optical scanning instruments for measurements at bench conditions

TC&TD на полноразмерном керне TC&TD on full or split cores



Профилирование неоднородности + TC&TD Heterogeneity profiling + TC&TD



TC&TD на стандартном керне TC&TD on core plugs





Аттестованные эталоны TC&TD Certified TC&TD references

Анализ неоднородности пород с помощью метода OC Heterogeneity rock analysis from OS measurements

Комбинация результатов теплового и механического профилирования

Combination of thermal and mechanical profiling

Пространственное разрешение Spatial resolution $\leq 0.2mm$





Gravelly sandstone

1982-2011: Прямые сравнения методов измерений Direct comparison of measurement methods

Popov, Pribnow, Sass, Williams, Burkhardt. **Geothermics, 1999**

- Более 30 лабораторий More than 30 laboratories
- 14 эталонов от 4 Бюро стандартов
 14 referencies from 4 Standard Bureaus
- Сравнение 11 методов измерений 11 methods under comparison.

ВЫВОДЫ CONCLUSIONS

- 1. Проблемы с измерениями TD и VHC Problems with TD and VHC measurements.
- 2. Занижение TC на 15-50% TC underestimation by 15-50%
- 3. Влияние теплового контакта Thermal contact influence
- 4. Особые проблемы с осадочными породами Especial problems with sedimentary rocks
- 5. Разрушение насыщенных пород Desintegration of brine-saturated rocks.
- 6. Проблемы с оценкой анизотропии Problems with anisotropy estimates





Optical scanning method





"Divided bar" method



"Hot disc" method

Прибор для измерений TC&TD при пластовых PT условиях Instrument for TC&TD Measurements at Formation PT Conditions





ПРЕИМУЩЕСТВА ADVANTAGES

- 1. Одновременное влияние P и T. Simultaneous P and T influence.
- 2. Три независимые компоненты давления. Three independent components of pressure.
- 3.Измерения TC и TD.TC and TD measurements.
- 4. Все компоненты тензоров TC и TD одновременно. All TC&TD tensor components simultaneously.

Ячейка для неконсолидированных образцов Cell for non-consolidated rock samples



Прибор для измерений температурного коэфф-та линейного расширения пород Instrument for rock thermal expansion coefficient measurements

Прибор для измерений TC&TD флюидов Instrument for measurements of TC&TD of fluids

Форма образца Rock sample form	Станд. керн Кубики (30 мм) Core plugs Cubes (30 mm)		
Диапазон T, °C T range, °C	20250		
Диапазон ТКЛР, К ⁻¹ CLTE range, K ⁻¹	(1…25)·10⁻ ⁶		
∆T _{min} , °C	20		
Погрешность, К ⁻¹ Uncertainty, K ⁻¹	0.3 ·10 ⁻⁶ при/at ∆T=20 °C		
Анизотропия Anisotropy studying	На одном образце On one sample		





T = -25…+180 ⁰C P = 0.1…50 MPa Вязкость флюида – (3-800)·10⁻⁴ Па·с Fluid viscosity – (3-800)·10⁻⁴ Ра⋅s



Эталонные меры ТКЛР CLTE standards



mm

30

Ø30

mm

Вертикальные вариации TC по данным массовых измерений Vertical variations in formation TC from numerous measurement data









Глубина, м Depth, km

Тепловая петрофизика в Программах глубокого научного бурения Thermal petrophysics in International Deep Drilling Program

(1983 – 2010, более 30 000 образцов керна, more than 30 000 cores)



Вертикальные вариации теплового потока Vertical variations in heat flow density

Кольская скважина (12262 м, Россия, 8252 образцов керна) Kola well (12262 m, Russia, 8252 cores) E P T H, km LITHOLOGIC COLUMN ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУР, мК/м ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА TEMPERATURE GRADIENT, mK/m HEAT FLOW DENSITY, mW/m² 50 60 70 25 30 40 16 22 q-Sa q+Sa G- SG Глубина, м Depth, m 3,5 Проницаемые зоны с флюидом 2 2.5 3 4 4.5 Теплопроводность λ, Вт/(м·К) Permeable zones with fluid Thermal Conductivity, W/(m·K)

Уральская скважина (6155м,Россия, 4414 образцов) Ural well (6155 m, Russia, 4414 cores)



Новые данные по тепловому потоку

New data on heat flow (1984 – 2011)

Скважина Well	Глубина Depth, m	Блок коры Crustal bloc	Образцы керна Core samples	Новые данные по ТП, New HFD data, mW/m ²	Прежние данные по ТП, Previous HFD data, mW/m ²	Разница данных Data difference
Кольская/Kola (Russia)	12262	Крист. фунд./ Crystalline basement	8252	55 - 63	31 – 39	69 %
Урал/Ural (Russia)	6155	Скл. область/ Fault belt	4414	51 - 58	20 – 27	132 %
Тимано- Печорская/ Timano-Pechora (Russia)	6904	Осад. чехол/ Sedimentary basin	383	60 - 72	38 – 54	43 %
Колва/Kolva (Russia)	7057	Осад. чехол/ Sedimentary basin	1016	63 - 78	36 - 47	70 %
Тюменская/ Tyumen (Russia)	7502	Осад. чехол/ Sedimentary basin	1243	75 - 90	52 – 60	47 %
Яксопойл /Yaxcopoil (Mexico)	1600	Импакт. стр-ра/ Impact structure	541	66 - 78	40– 52	56 %
Воротиловская/ Vorotilovo (Russia)	5374	Импакт. стр-ра/ Impact structure	3715	53 - 56	40 – 49	22 %
Айрвилл/ Eyreville (USA)	1766	Импакт. стр-ра/ Impact structure	497	73 - 82	46 - 56	49 %
Саатлинская/ Saatly (Azerbaijan)	8200	Осад. чехол/ Sedimentary basin	225	45 - 60	30 - 37	57 %
Ен-Яхинская/Yen- Yakha (Russia)	8250	Осад. чехол/ Sedimentary basin	449	74 - 91	52 - 60	46 %

Ярегское месторождение тяжелой нефти: 4D моделирование тепловых свойств пласта

Yarega heavy oil field: 4D modeling reservoir thermal properties

(Попов, Чертенков, Стенин и др., *Каротажник, №7, 2011*)

Изучены 502 образца керна при насыщении 3 флюидами, при нормальных и пластовых темобарических условиях

502 cores studied at saturation with 3 fluids and at normal and reservoir thermobaric conditions

Результаты / Results



- Полный набор тепловых свойств нефте-, водо- и паронасыщенных пород Full set of thermal properties of oil-, brine-, and steam-saturated rocks
- 3D пространственные вариации тепловых свойств в пласте и формации 3D spatial variations in thermal properties within reservoir and formation
- Временные вариации тепловых свойств, вызванные изменениями температуры и порового флюида

Temporal variations in thermal properties caused by temperature variations and pore fluid changes

- Новые корреляции с фильтрационно-емкостными и акустическими свойствами New correlations with reservoir and acoustic properties
- Первый подобный эксперимент в нефтяной геофизике First similar experiment in oil geophysics

Пространственно-временные вариации тепловых свойств как основа 4D моделирования

Spatial-temporal variations in rock thermal properties as base for 4D modeling



Корреляции свойств для Ярегского месторождения тяжелой нефти Correlations of rock properties for heavy oil field Yarega





Диапазоны тепловых свойств месторождения Ярега Ranges of thermal properties for oil field Yarega

4D вариации тепловых свойств пород 4D variations in thermal properties of formation

• теплопроводность / thermal conductivity 0.8...5.2 W/(m·K)

- температуропроводность / thermal diffusivity (0.5...2.5) ·10⁻⁶ m²/s
- объемная теплоемкость / volumetric heat capacity 1.3...3.5 MJ/(m³·K)

• ТКЛР / linear thermal expansion coefficient (8...17)-10⁻⁶ К⁻¹

Сравнение новых и прежних данных (средние значения)

Comparison on new and previous data (average)

Теплопроводность, Вт/(м ·K) Thermal conductivity, W/(m·K)	Предыдущие Previous	Новые <mark>New</mark>	Расхождение, % Difference, %
пласт / reservoir	2.32	3.60	56
вмещающие породы / surrounding rocks	1.51	2.65	76
Температуропроводность, мм²/с Thermal diffusivity, mm²/s			
пласт / reservoir	1.06	1.60	51
вмещающие породы / surrounding rocks	1.00	1.75	75

Выводы

Conclusions

1. Новая экспериментальная база обеспечивает значительное повышение качества экспериментальных данных о тепловых свойствах резервуаров.

2. Тепловые свойства осадочных пород характеризуются значительными пространственными вариациями и существенно зависят от температуры и вида порового флюида.

3. Представительные экспериментальные данные о тепловых свойствах резервуаров позволяют повысить качество гидродинамического моделирования резервуаров применительно к тепловым методам добычи нефти.

4. Применение прежних данных о тепловых свойствах осадочных пород и подходов к моделированию тепловых свойств требует осторожности, так как может привести к серьезным ошибкам при гидродинамическом моделировании резервуаров при проектировании тепловых методов добычи.

1. New experimental technique provides essential improvement of quality of experimental data on the thermal properties of reservoirs.

2. Thermal properties of sedimentary rocks are characterized by essential spatial variations and depend significantly on temperature and pore fluid type.

3. Representative experimental data on reservoir thermal properties allow to improve quality of reservoir hydro-dynamical modeling for thermal methods of EOR.

4. Using previous data on sedimentary rock thermal properties and approaches to thermal property modeling requires especial care since it could cause essential errors in hydro-dynamical modeling reservoirs at designing thermal methods of EOR.