



УДК 550.822

АНАЛИЗ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЛЕКСОМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ КАРОТАЖА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

ANALYSIS OF TELEMETRY SYSTEM WITH A COMPLEX OF GEOPHYSICAL DEVICES FOR REAL-TIME LOGGING

Сафронов Сергей Ивановичдоцент,
Удмуртский государственный университет**Дё Александр Дмитриевич**старший преподаватель,
Удмуртский государственный университет**Шафигуллин Айнур Муллаунович**бакалавр,
Удмуртский государственный университет
rsg078829@mail.ru**Safronov Sergej Ivanovich**Associate professor,
Udmurt State University**Dyo Aleksandr Dmitrievich**Senior lecturer,
Udmurt State University**Shafigullin Ajnur Mullanurovich**Bachelor,
Udmurt State University
rsg078829@mail.ru

Аннотация. При современном уровне развития техники и технологий бурения информация о характеристиках пласта, получаемая в процессе бурения, является недостаточной. Необходимо иметь данные о кровле и подошве пласта, информацию о разрезе впереди долота, а также информацию о приближении к соседним скважинам. Это возможно за счет систем MWD (измерения в процессе бурения), LWD (каротажа в процессе бурения), роторных управляемых систем (RSS). В работе рассмотрены компоненты системы каротажных приборов: HAGR (High Temperature Azimuthal Gamma Ray) – прибор для измерения естественного гамма-излучения MFR (Multi-Frequency Resistivity) – Многочастотный датчик сопротивления; TNP (Thermal Neutron Porosity) – Датчик нейтронной пористости; AZD (Azimuthal Density) – Азимутальный датчик плотности. Даны их характеристики, достоинства и недостатки.

Annotation. Under current level of technical and technological development the information about reservoir characteristics which is collected during drilling process is not sufficient. It is necessary to own data about the top and bottom of the bed, have an information about geological cross-section in front of the drilling bit as well as information about approaching to neighboring wells. This is possible due to MWD systems (measurement while drilling), LWD systems (logging while drilling), rotary steerable systems (RSS). This research deals with components of logging devices: HAGR (High Temperature Azimuthal Gamma Ray) – device for measuring of natural gamma radiation; MFR (Multi-Frequency Resistivity) – multi-frequency resistance sensor; TNP (Thermal Neutron Porosity) – neutron porosity sensor; AZD (Azimuthal Density) – azimuthal density sensor. Their characteristics, advantages and disadvantages are described in this work.

Ключевые слова: технология logging while drilling (LWD) – геофизические исследования в процессе бурения; HAGR (High Temperature Azimuthal Gamma Ray) – прибор для измерения естественного гамма-излучения MFR (Multi-Frequency Resistivity) – Многочастотный датчик сопротивления; TNP (Thermal Neutron Porosity) – Датчик нейтронной пористости; AZD (Azimuthal Density) – Азимутальный датчик плотности.

Keywords: logging while drilling (LWD) technology – geophysical prospecting in drilling process; HAGR (High Temperature Azimuthal Gamma Ray) – device for measuring of natural gamma radiation; MFR (Multi-Frequency Resistivity) – multi-frequency resistance sensor; TNP (Thermal Neutron Porosity) – neutron porosity sensor; AZD (Azimuthal Density) – azimuthal density sensor.

Одним из важных достижений в области совершенствования телеметрических систем являются модульные системы, рассчитанные на максимальную эффективность и гибкость, более дешевы и экономичны по сравнению с любыми другими [1–4]. Все оборудование такой системы имеет модульную конструкцию с полной совместимостью модулей, что дает возможность приобрести его в любом наборе, в виде отдельных секций или полным комплектом. Использование подобных систем помимо контроля навигационных и технологических параметров позволяет частично проводить комплекс геофизических исследований без остановки процесса бурения (технология logging while drilling (LWD) – геофизические исследования в процессе бурения). В частности, с помощью систем подобного типа можно осуществлять контроль за параметрами: естественное гамма излучение разбуриваемых горных пород; кажущееся сопротивление горных пород КС; сопротивление поляризации ПС; электромагнитный каротаж; гамма-гамма каротаж; нейтронно-нейронный каротаж; акустический каротаж; кавернометрия; виброметрия.



Однако при современном уровне развития техники и технологий бурения информация о характеристиках пласта, получаемая в процессе бурения, является недостаточной. Необходимо иметь данные о кровле и подошве пласта, информацию о разрезе впереди долота, а также информацию о приближении к соседним скважинам. Усложнение процесса бурения стимулирует дальнейшее развитие разработок телеметрических систем.

Решения в области наклонно-направленного бурения компании Weatherford способствуют повышению эффективности бурения горизонтальных скважин, в том числе при уплотнении скважинной стеки на месторождении; облегчают разработку труднодоступных пластов, где требуются сложные траектории стволов скважин, а также помогают оптимизировать пространственное положение скважин для минимизации возможных рисков. Компания Weatherford располагает новейшими технологиями и оборудованием, с помощью которых были достигнуты новые рекордные достижения в отрасли. Это системы MWD (измерения в процессе бурения), LWD (каротаж в процессе бурения), роторные управляемые системы (RSS), а также высокопроизводительные забойные двигатели. Помимо этого, Weatherford является единственной компанией на рынке, в чей арсенал входит система LWD, интегрированная с РУС, которая способна функционировать при температуре свыше 180 °С.

Состав и параметры приборов комплекса ГИС, указаны на рисунке 1.



- Датчик шоков и вибраций (ESM)
- Датчик давления в трубном и затрубном пространстве (BAP)
- Датчик пористости по данным нейтронного каротажа (TNP)

- Датчик плотности (AZD)

- Датчик удельного сопротивления (MFR)
- Датчик гамма-каротажа (HAGR)

- Датчик инклинометрии (IDS)

- Роторно-управляемая система (RSS)

Рисунок 1 – Общий вид телеметрической системы с комплексом геофизических приборов для каротажа в режиме реального времени

Рассмотрим некоторые компоненты системы каротажных приборов подробнее.

1. **HAGR (High Temperature Azimuthal Gamma Ray)** – прибор для измерения естественного гамма-излучения

Представляет собой пассивные детекторы радиоактивного гамма-распада, происходящего внутри пластов. Тремя наиболее распространенными гамма-активными изотопами являются Калий – 40, Торий – 232 и Уран – 238. Высокие значения интенсивности гамма-излучения, измеряемые датчиком, указывают на высокую концентрацию радиоактивного материала. Обычные устройства детектирования гамма-излучения не могут определить происхождение гамма-излучения, что связано с используемым в них типом детектора (счетчики Гейгера-Мюллера). Датчики гамма-излучения указывают содержание материнской глины, но не показывают непосредственное содержание флюидов (например, газа, нефти, воды). Могут применяться в любой среде – воздухе, флюидах с любой степенью минерализации, флюидах на нефтяной основе, в обсаженных и необсаженных стволах скважин.

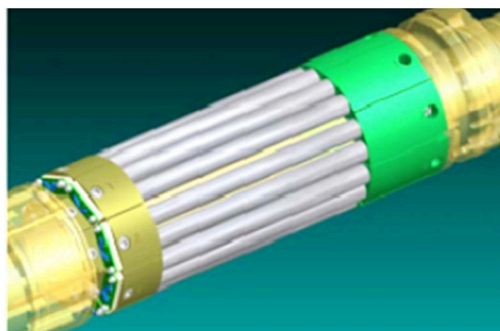


Рисунок 2 – Датчик HAGR

Датчик HAGR может быть смонтирован в модуль HEL, MFR либо RSS. В зависимости от этого и конструкционные параметры будут соответствовать одному из этих модулей (рис. 2).

Глубина исследования детектора гамма-каротажа составляет 9–12 дюймов (23–30 см). Разрешающая способность по вертикали составляет 18 дюймов (46 см).

2. **MFR (Multi-Frequency Resistivity)** – Многочастотный датчик сопротивления.

Датчик сопротивления электромагнитной волны основан на принципе проникновения радиочастотных (РЧ) волн сквозь горную породу. Распространение волны РЧ контролируется на следующих физических свойствах материала, через который волна проходит:

- электрическая проводимость, которая представляет способность материала проводить электрический поток;
- диэлектрическая проницаемость, которая представляет способность материала накапливать электрическую нагрузку;
- магнитная проницаемость, которая представляет способность материала намагничиваться.

Передатчики расположены на разном расстоянии (выше и ниже) приемников. Каждый передатчик издает электромагнитный сигнал один за другим (поочередно). Изменение фазы или амплитуды сигнала, измеренного обоими приемниками, используется для определения удельного сопротивления пласта. Конфигурация с верхним и нижним передатчиком (симметрия антенн) позволяет применять к данным поправки по влиянию температуры скважины, так как по мере увеличения температуры электропроводимость увеличивается (сопротивление уменьшается).

На рисунке 3 представлен принцип действия многочастотного датчика сопротивления MFR.

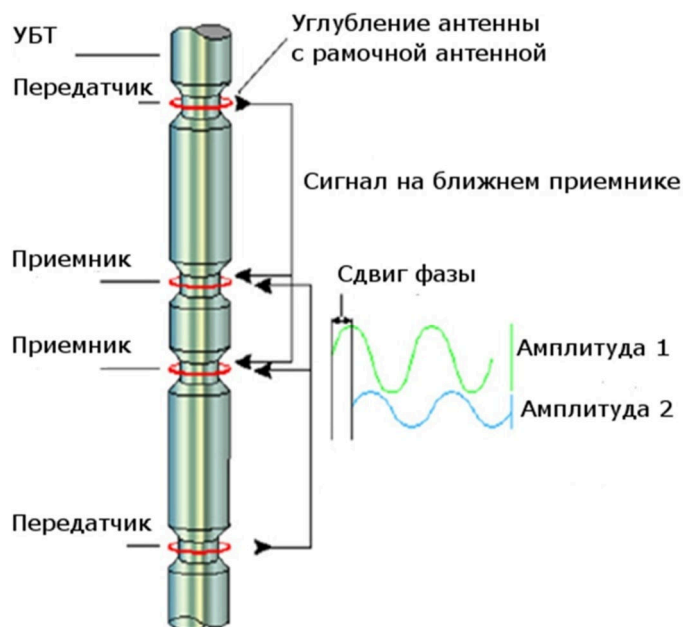


Рисунок 3 – Принцип работы многочастотного датчика MFR

Конструкция многочастотного датчика сопротивления MFR с тремя (MFR-80 с четырьмя) передатчиками обусловлена следующими факторами:

- глубина исследования датчика увеличится с увеличением расстояния между передатчиком и приемником;



– благодаря разным расстояниям между передатчиком и приемником достигается возможность измерения исследуемой области на разных зонах проникновения фильтрата бурового раствора.

Данная конструкция датчика дает возможность определения сопротивления в различных зонах:

- зона бурового раствора;
- загрязненная зона буровым раствором;
- чистая (нетронутая зона).

Симметричное расположение передатчиков (рис. 4) компенсирует влияние температуры среды в скважине.

Таким образом, данные от многочастотного датчика сопротивления MFR используются для:

- разделения углеводородов и соленой воды (рис. 5);
- определения мощности пласта, глинизации пласта, определения пористости пласта, флюидонасыщенности, подвижных флюидов (индикатор проницаемости);
- оценки запасов на месте залегания;
- предсказания аномального порового давления пласта;
- указания границ пласта для горизонтальных скважин.

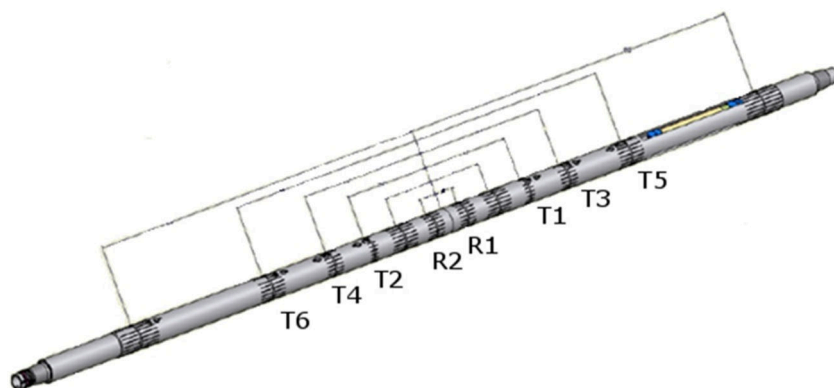


Рисунок 4 – Внешний вид многочастотного датчика сопротивления MFR

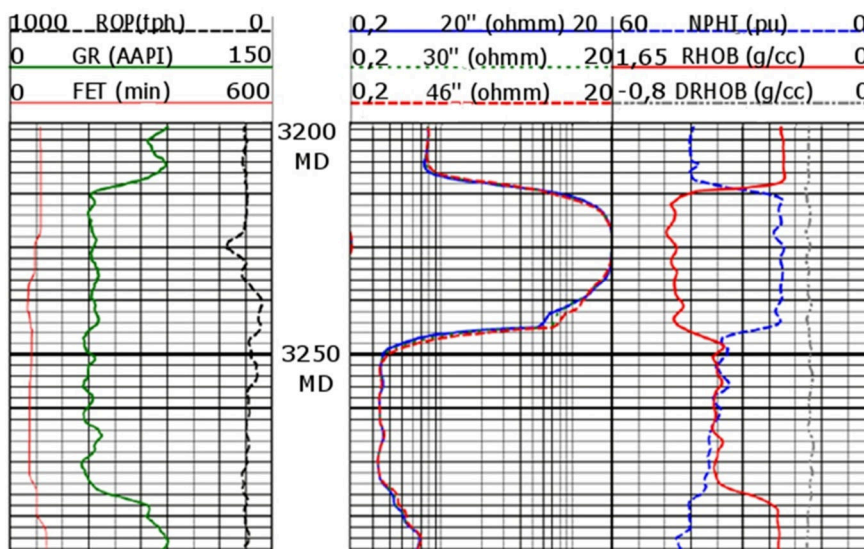


Рисунок 5 – Определения газо-водяного контакта

Характеристики и преимущества датчика MFR (табл. 1):

- решетка полностью компенсированной антенны, встроенная в утяжеленную буровую трубу для обеспечения повышенной надежности;
- полностью цифровая электроника измеряет фазу и затухание в каждой паре приемопередатчиков, что обеспечивает высокоточные измерения;
- три интервала между приемопередатчиками позволяют получить 12 полностью компенсированных замеров фазы и затухания на разных расстояниях по радиусу от ствола скважины.

Диаметр исследования 5 м при 20 Ом·м обеспечивает самое глубокое измерение сопротивления во время бурения.



Таблица 1 – Основные параметры датчика сопротивления MFR

Диапазон измерений (фаза), Ом · м	0,1–3000
Точность (фаза, все интервалы), мкОм	± 0,25
Диапазон измерений (затухание), Ом · м	0,1–200
Точность (затухание, все интервалы), мкОм	± 0,25
Глубина исследования	Изменяется в зависимости от типа измерения, частоты, интервала и сопротивления пласта
Разрешение по вертикали	Изменяется в зависимости от типа измерения, частоты, интервала и сопротивления пласта

3. TNP (Thermal Neutron Porosity) – Датчик нейтронной пористости

Принцип работы нейтронного датчика пористости заключается в том, что химический источник (Am^{241}/Be) генерирует нейтроны, которые рассеиваются в пласте (свободные нейтроны в природе не существуют). При столкновении с ядрами в пласте эти надтепловые или быстрые нейтроны замедляются. Лучшими замедлителями нейтронов являются ядра водорода, так как их атомные массы очень близки (20–30 соударений). В некоторой точке нейтрон замедляется настолько, что он больше не способен двигаться и находится в состоянии с очень низкой энергией, в этом случае его называют тепловым нейтроном. В этом состоянии тепловые нейтроны легко поглощаются или захватываются другими ядрами, в частности, хлором. При захвате тепловых нейтронов испускается гамма-излучение захвата.

Измерение пористости нейтронами позволяет судить о полной пористости пласта, при этом измеряется эффект, который скелет породы и поровые жидкости оказывают на изучаемые нейтроны (индикатор содержания водорода). Так как нейтроны и водород обладают практически одинаковой массой, то при их столкновении от нейтрона на атом водорода передается большое количество энергии (как бильярдные шары). Как правило, водород в пласте существует только в виде воды и углеводородов.

Если вблизи источника находится пласт с высоким содержанием водорода, то излучаемые нейтроны будут быстро замедляться, и в результате расстояние пробега от источника будет коротким, а детектор будет регистрировать малое число импульсов. При низком содержании водорода в пласте вблизи источника излучаемые нейтроны не будут быстро замедляться, и в результате расстояние пробега от источника удлинится, а детектор будет регистрировать большое число импульсов. Зависимости для измерений следующие:

- высокое содержание водорода – высокая пористость – малое число отсчетов;
- низкое содержание водорода – низкая пористость – большое число отсчетов.

Конструкция, содержащая несколько детекторов, в сочетании с более сильным источником нейтронов обеспечивает исключительную статистическую воспроизводимость измерений. Оптимизированные интервалы He^3 детектора позволяют проводить измерения с высокой точностью и снизить влияние окружающих условий. Несколько детекторов на каждом интервале обеспечивают дублирование измерений для повышения качества каротажа и выдачи данных. Источник излучения нейтронов – Am^{241}/Be , 18 кюри.

Датчик нейтронной пористости TNP указывает присутствие газообразного углеводорода (рис. 6, 7) только в комбинации с датчиком плотности пластов. Датчик нейтронной пористости TNP конструктивно совмещен в одном модуле с азимутальным датчиком плотности AZD.

4. AZD (Azimuthal Density) – Азимутальный датчик плотности (рис. 8).

Источник $Cs-137$ распространяет гамма-излучение путем рассеяния Комптона. Сцинтилляционные детекторы измеряют количество и энергию гамма-лучей, которые отражаются обратно к инструменту.

Целью измерения плотности является определение объемной плотности пласта с помощью измерения ослабляющего воздействия, которое оказывают материнская порода и поровые жидкости на распространяемые гамма-лучи (функция объемной плотности электронов) (рис. 9). По мере того, как гамма-излучение взаимодействует с материалами с высокой плотностью электронов, оно быстрее теряет энергию. Другим побочным результатом измерения является фотоэлектрический эффект, который позволяет специалисту по анализу каротажных данных определить минералогию.

Материнская порода ослабляет гамма-излучение в большей степени, чем поровые жидкости, так как она является более плотной.

Датчики плотности для проведения каротажа во время бурения представляют собой контактные устройства, что означает, что пластина датчика и источник находятся в контакте со стенкой ствола скважины.

Данные по плотности считаются более точными, чем нейтронные или акустические данные, так как измерение является более прямым.



Рисунок 6 – Компоненты датчика пористости TNP

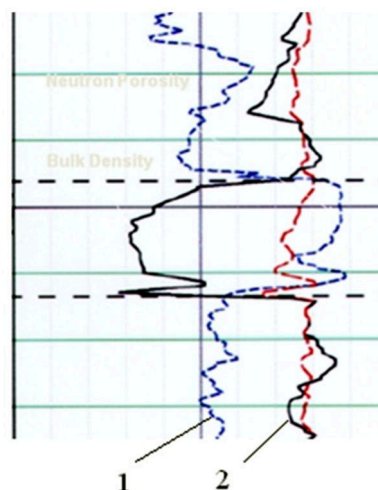


Рисунок 7 – Интерпретация данных нейтронной пористости:
1 – линия нейтронного каротажа;
2 – линия плотностного каротажа



Рисунок 8 – Азимутальный датчик плотности

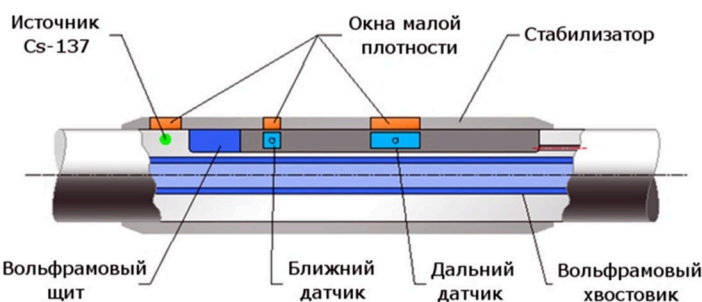


Рисунок 9 – Компоненты азимутального датчика плотности AZD

Области применения датчика плотности (табл. 2, рис. 10):

- определение объемной плотности пласта; литологии и минералогии (фотоэлектрический эффект);
- указывает на присутствие газообразного углеводорода в сочетании с датчиком для определения пористости по нейтронному каротажу.

После окончания бурения горизонтального участка проводится комплексный каротаж геофизическими приборами. Для проведения комплексного каротажа продуктивного пласта в открытом стволе используется геофизический прибор типа АМАК (аппаратурно-методический автономный комплекс). АМАК спускается в скважину на бурильном инструменте и записывает показания телеметрических зондов в память прибора. Считывание и интерпретация данных из памяти прибора происходит после подъема АМАК.

Таблица 2 – Параметры датчика AZD/TNP

Измерение	Точность	Повторяемость
Плотность, кг/м ³	± 0,015	± 0,0075
Пористость по данным нейтронного каротажа, %	± 0,5	± 0,75
Фотоэлектрический эффект (P _e), В/е ⁻	± 0,05	± 0,25

Таким образом, проведение комплексного каротажа продуктивного пласта в горизонтальном участке скважины на бурильном инструменте с помощью геофизического прибора АМАК имеет следующие недостатки:

- необходимость подготовки открытого ствола скважины к спуску геофизического прибора;
- потери времени на проведение каротажа (20 – 40 часов);
- проникновение бурового фильтрата в исследуемую зону пласта, что приводит к искажению.

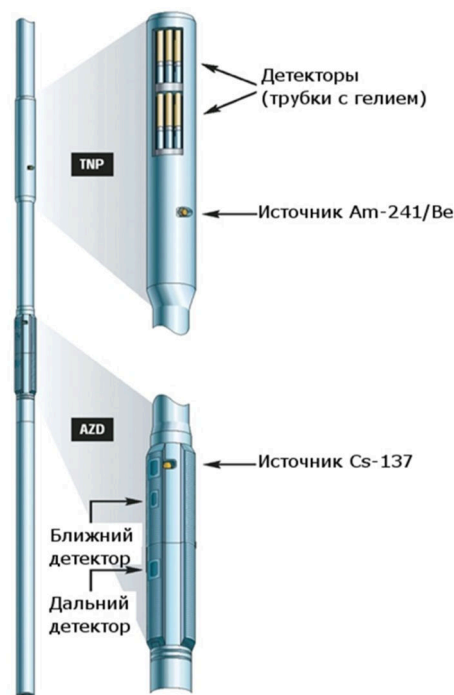


Рисунок 10 – Общий вид датчика AZD/TNP

При использовании телеметрического оборудования системы LWD (измерения и каротаж во время бурения) компании Weatherford устраняются вышеупомянутые недостатки окончательного каротажа при строительстве наклонно-направленных скважин с горизонтальным окончанием. Так как система LWD включает в себя измерения и каротаж в процессе бурения, с возможностью передачи данных от забойного оборудования на дневную поверхность в режиме реального времени.

Применение телеметрического оборудования системы LWD в процессе бурения скважин имеет следующие преимущества:

- все измерения для управления траекторией ствола скважины в процессе бурения производятся в режиме реального времени;
- возможность точного бурения скважины при эффективном попадании в заданную зону малого размера и предвидеть изменение флюида и типа пород;
- определение состава флюида (газ, нефть, вода) в пласте и реперных горизонтов для обеспечения корреляции с соседними скважинами;
- модульное исполнение приборов для измерения и каротажа в процессе бурения дает оператору выбор схемы сборки приборов для спуска на различных участках скважины;
- получение каротажных диаграмм, не уступающих или превосходящих по качеству данные каротажа с геофизического прибора типа АМАК;
- измерения могут быть произведены до или после вхождения в распознаваемые зоны с подвижным флюидом.

Бурение горизонтального участка скважины на Самбургском месторождении было проведено с глубины 3642 м до глубины 4320 м по стволу (проектный забой) за 5 суток с регистрацией необходимых технологических и геофизических параметров, а также получением таких петрофизических параметров, как интервалы коллектора, глинистость, пористость, проницаемость, характер насыщения и нефтенасыщенность.

Компоновка низа бурильной колонны включала в себя следующее оборудование: винтовой забойный двигатель WF 475 QLE6759-ML, высокотемпературный прибор азимутального гамма-каротажа HAGR, прибор многочастотного электрического каротажа MFR, прибор азимутальной плотности и лито-плотностного каротажа AZD, прибор нейтронного каротажа по тепловым нейтронам TNP. Кроме геофизических приборов в компоновку входили датчик давления в трубах и затрубном пространстве ВАР и датчик вибрационных нагрузок ESM. После подъема компоновки был проведен каротаж на трубах. Общее время проведения каротажа составило 29 часов, не считая времени на интерпретацию полученных данных. При сопоставлении данных LWD и каротажа на трубах было отмечено следующее. Глубины методов и показания больших зондов электрического каротажа практически полностью соответствуют друг другу. Однако на кривых электрического каротажа «АГС Горизонталь» отмечается расхождение показаний кривых (радиальный градиент) с пониженными удельными сопротивлениями на малых зондах, что обусловлено проникновением фильтрата бурового раствора в



пласт. Стоит отметить, что с помощью компоновки LWD компании Weatherford, по сравнению с «АГС Горизонталь», можно осуществлять дополнительный геофизический метод исследований – литоплотностной каротаж с регистрацией объемной плотности пород и фотоэлектрического эффекта Ре. Это позволяет более точно оценивать литологию и, следовательно, пористость пласта, а также обнаруживать наличие газа. Так, по результатам кросс-плот-анализа данных нейтронного и литоплотностного каротажа в кровле горизонтального ствола был выделен нефтенасыщенный интервал с повышенным газовым фактором.

Литература:

1. Строительство горизонтальных скважин / В.И. Кудинов [и др.]. – М. : ЗАО «Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2007. – 688 с.
2. Климов В.В. Геофизические исследования скважин : учебное пособие / В.В. Климов, А.В. Шостак; ФГБОУ ВПО «КубГТУ». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2014. – 220 с.
3. Булатов А.И. Бурение нефтяных и газовых скважин: учебно-методическое пособие / А.И. Булатов, С.В. Долгов. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2015. – 674 с.
4. Булатов А.И. Научные основы и практика освоения нефтяных и газовых скважин : монография / А.И. Булатов, О.В. Савенок, Р.С. Яремийчук. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – 576 с.

References:

1. Construction of horizontal wells / V.I. Kudinov [etc.]. – M. : CJSC Neftyanoye hozyaystvo Publishing House, 2007. – 688 p.
2. Klimov V.V. Geophysical surveys of wells : manual / V.V. Klimov, A.V. Shostak; FGBOU VPO «KUBGTU». – Krasnodar : Publishing house – South, 2014. – 220 p.
3. Bulatov A.I. Drilling of oil and gas wells : educational and methodical grant / A.I. Bulatov, S.V. Dolgov. – Krasnodar : Publishing house – South, 2015. – 674 p.
4. Bulatov A.I. Scientific bases and practice of development of oil and gas wells : monograph / A.I. Bulatov, O.V. Savenok, R.S. Yaremychuk. – Krasnodar : Publishing house – South, 2016. – 576 p.