

Каротаж в процессе бурения – эффективный тайм-менеджмент и надежная база для оценки подсчетных параметров пласта

А.В. Новиков, Д.Н. Губинский, Е.А. Зарай

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», г. Тюмень, Россия

E-mail: avnovikov10@tnnc.rosneft.ru

Аннотация. Показаны актуальность и экономическая эффективность применения технологии регистрации геофизических параметров в процессе бурения. Проведен сравнительный анализ исходных геофизических данных, записанных во время и после бурения в наклонно-направленных скважинах. Приводятся основные выводы анализа полученных фильтрационно-емкостных свойств и эффективных толщин по данным каротажа на кабеле и в процессе бурения.

Ключевые слова: каротаж, каротаж во время бурения, интерпретация данных геофизических исследований скважин, петрофизика, бурение, геонавигация, фильтрационно-емкостные свойства, коллектор.

Для цитирования: Новиков А.В., Губинский Д.Н., Зарай Е.А. Каротаж в процессе бурения – эффективный тайм-менеджмент и надежная база для оценки подсчетных параметров пласта // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 3(34). С. 49–60. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art4>

Введение

Сервис буровых работ является неотъемлемой составляющей процесса строительства нефтяных и газовых скважин. С развитием технологий и методов добычи углеводородного сырья, в частности, горизонтального и наклонно-направленного бурения, все шире применяемого за последнее десятилетие, данная область производства шагнула далеко вперед.

Получили развитие рецептура буровых растворов, сферы цементирования и крепления скважин. Стремительно совершенствуются телеметрия и планирование наклонно-направленного бурения, улучшаются геонавигация (оптимальное размещение ствола скважины на основе результатов скважинных геологических и геофизических измерений в реальном времени) и способы доставки геофизического оборудования на забой скважины.

Наибольший объем проводимого каротажа осуществляется на трубах или геофизическом кабеле, учитывая прогрессирующие объемы бурения, актуальные на сегодняшний день. Тем не менее, в гонке за эффективными буровыми программами, при строительстве скважин все чаще прибегают к такой активно-развивающейся технологии, как каротаж в процессе бурения (Logging while drilling, далее – LWD), который подходит как для разведки новых, так и для оптимальной разработки уже эксплуатируемых месторождений.

Технологии регистрации измерений в процессе бурения берут свое начало еще с 1940-х годов, когда телеметрию пытались осуществить путем использования грязевых импульсов, проводных труб, акустики и электромагнетизма.

Сейчас каротаж в процессе бурения к новинкам в мире технологий не отнесешь, и он уверенно занимает свое место в сфере строительства скважин.

В данной статье на примере одного из месторождений Западной Сибири авторы представляют комплексный анализ данных, записанных во время и после бурения, цель которого – определить, является ли информация, полученная в процессе бурения, столь же достоверной для оценки фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора, что и на кабеле.

Разрез рассматриваемого месторождения преимущественно представлен песчаниками средне-мелкозернистыми и мелкозернистыми, в различной степени алевритистыми и алевритовыми, сцементированными глинистым, участками глинисто-карбонатным, цементом; а также аргиллитами алевритовыми, слабослюдистыми, линзовидно-, волнисто-линзовидно-слоистыми. Диапазон изменения ФЕС пород-коллекторов соответствует значениям пористости 10,6–15,0%, проницаемости – 0,1–21,1 мД.

Каротаж в процессе бурения

Преимущества и недостатки технологии

Каротаж во время бурения – это метод доставки приборов ГИС (геофизические исследования скважин) в ствол скважины, как часть компоновки низа бурильной колонны (КНБК).

Результаты, получаемые инженерами на поверхности, можно отслеживать как в реальном времени, так и считывать из памяти прибора после проведения записи.

Изначально технология LWD позиционировалась как дополнение – усовершенствование более ранней технологии Measurements while drilling

(с англ.: «измерения в процессе бурения»). С ее помощью планировалось полностью или частично заменить операции каротажа на кабеле (Wireline logging, далее – WL). И, действительно, благодаря развитию технологии в последние десятилетия, каротаж в процессе бурения стал широко применяться в бурении скважин, обладая рядом преимуществ над традиционным каротажем.

Важным достоинством является высокое качество данных ГИС, записанных в процессе бурения за малое время, прошедшее после вскрытия продуктивного горизонта. Глубина проникновения фильтрата бурового раствора при исследованиях во время бурения, как правило, составляет несколько сантиметров, что способствует более корректной оценке удельного электрического сопротивления исследуемого пласта, которое используется при определении коэффициента водонасыщенности по экспериментальным зависимостям Дахнова–Арчи.

Отметим, что применение LWD значительно сокращает время на исследования скважины за счет отказа от определенной доли спускоподъемных операций при бурении наклонно-направленного ствола.

Одним из основных преимуществ каротажа в процессе бурения является возможность получать данные из скважины в реальном времени, осуществляя управление траекторией ствола скважины для сохранения положения долота на оптимальной глубине вблизи кровли продуктивного пласта и максимального процента проводки скважины по продуктивной части (вскрытому коллектору). Данные, получаемые в процессе бурения, позволяют оперативно оценить состояние пласта, его фильтрационно-емкостной потенциал и пластовое давление.

Также при регистрации азимутальной развертки свойств горных пород околоскважинной зоны (микроимиджей) есть возможность оценить устойчивость ствола скважины и вовремя внести корректировки в программу бурения запланированного фонда.

Безусловно, помимо перечисленных преимуществ, технология имеет ряд недочетов. Так, из недостатков LWD можно отметить:

- зачастую менее дифференцированные кривые ГИС, регистрируемые в процессе бурения, а также их искажение за счет таких технологических факторов, как вибрация колонны в интервалах набора оборотов забойным двигателем;

- неполное прижатие приборов к стенке скважины в случае большого угла

наклона ствола, влияния вмещающих горных пород;

- проблемы с декодированием сигнала и пр.

Рассматривая экономический эффект от применения технологии, следует учитывать высокую стоимость проведения каротажа во время бурения, которая значительно выше относительно проведения традиционного комплекса ГИС на геофизическом кабеле.

Перспективы каротажа во время бурения

Положительная динамика роста горизонтального и наклонно-направленного бурения, начиная с 2006 г., все чаще влечет за собой введение LWD в программу строительства скважин (рис. 1).

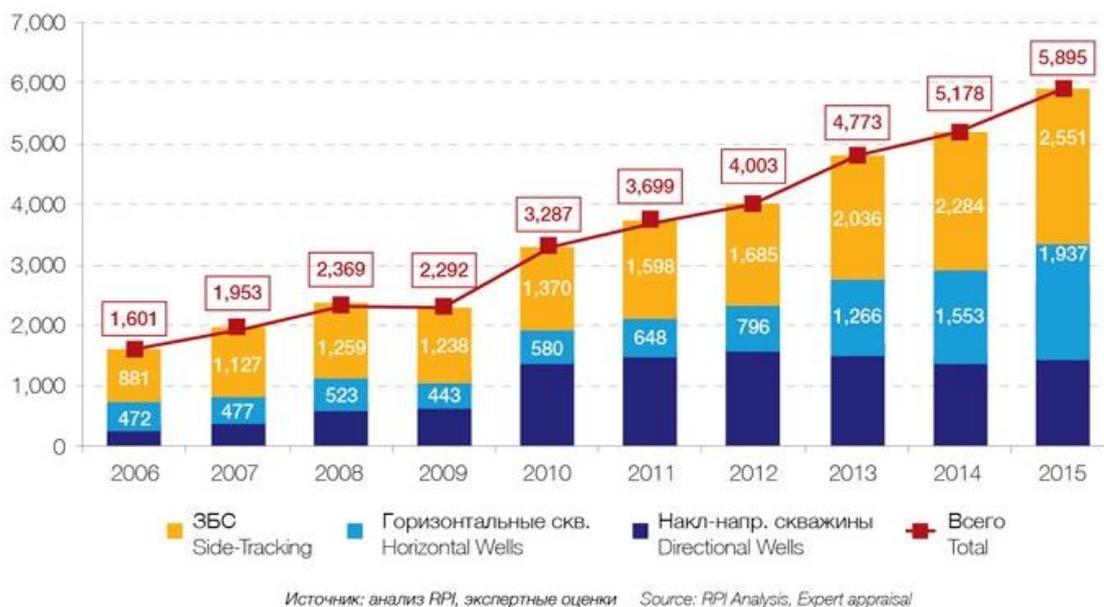


Рис. 1. Количество операций LWD, произведенных в России в 2006–2015 гг. [1]

Количество операций LWD выросло более чем в 3 раза и продолжает увеличиваться по сей день. Российский рынок не является исключением. За ростом количества операций «зарезки»

боковых стволов следует и дополнительное число спуско-подъемных операций, что, в свою очередь, чревато повышенными рисками возникновения аварий на производстве [2].

Применительно к рассматриваемому в работе месторождению можно выделить ключевые предпосылки развития технологии каротажа во время бурения:

- Рост объемов бурения стволов со сложной траекторией;
- Осложнения при строительстве скважины:
 - особенности литологического строения разреза (осыпание пород и нарушение устойчивости ствола скважины),
 - гидратообразование и др.;
- Стремление к экономически эффективным буровым программам.

В перспективе, рынок услуг по LWD будет расти как в стоимостном выражении, так и по количеству операций, что, прежде всего, связано с повышением спроса на более технологически сложные и, соответственно, дорогие решения для горизонтального и наклонно-направленного бурения. Второй веской причиной является труднодоступность и суровые погодные условия районов работ в удаленных регионах, что удорожает работу геофизических партий.

Обзор аппаратуры LWD

Крупные сервисные компании, инвестирующие значительные средства в исследования и разработки, не просто

располагают более широким спектром инструментов LWD, но и расширенной сферой применимости каротажных приборов в сложных условиях бурения. Это является весомым фактором при выборе заказчиком способа доставки каротажного прибора в пласт, что обусловлено освоением новых территорий в труднодоступных уголках нашей страны, где, зачастую, суровые климатические условия позволяют доставить необходимую технику лишь в определенное время года.

На текущий момент разнообразие подрядчиков и предоставляемых услуг в сфере проведения каротажа достаточно обширно. Так, среди российских компаний, ведущих разработку приборов LWD, данную технологию предлагают НПФ «АМК Горизонт», ООО «ТНГ-ГРУПП», ООО «НПП Энергия», АО «Башнефтегеофизика» и др.

Кроме того, существуют зарубежные лидеры, именуемые так называемой «большой четверкой»: Schlumberger, Halliburton, Weatherford, Baker Hughes [3].

В скважинах, на примере которых в работе приведен анализ данных, каротаж проведен компаниями-лидерами данного сегмента и включает оптимальный набор исследований, качество проведения которых принято считать на высоком уровне (табл. 1).

Таблица 1

Комплекс методов исследований, предлагаемый компаниями «большой четверки»

Раздел	Метод ГИС	Schlumberger	Halliburton	Weatherford	Baker Hughes
1	2	3	4	5	6
Электрометрия	ИКЗ (индукционное каротажное зондирование)	+	+	+	+
Радиометрия	ГК (гамма-каротаж)	+	+	+	+
	СГК (спектральный гамма-каротаж)	+		+	+

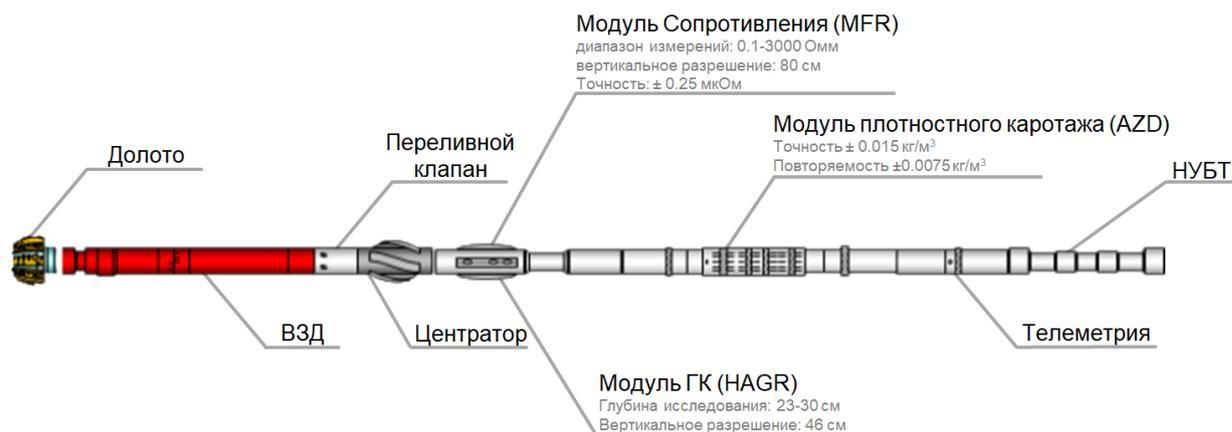
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
	ГГКп (гамма-гамма плотностной каротаж)	+	+	+	+
	ГГКлп (гамма-гамма каротаж литоплотностной)	+		+	+
	ННК (нейтрон-нейтронный каротаж)	+	+	+	+
	ИНГКс (импульсный нейтронный гамма-каротаж спектрометрический)	+			
Акустические методы	АК (акустический каротаж)	+		+	+
	АКШ (акустический каротаж широкополосный)	+			+
Кавернометрия	КВ (кавернометрия)	+		+	+
Ядерные методы	ЯМК (ядерно-магнитный каротаж)	+	+		+
Инклинометрия	Инклинометрия	+	+	+	+

В большинстве скважин рассматриваемого месторождения каротаж во время бурения выполнен комплексной аппаратурой от компании Weatherford [4], включающий в себя следующий набор методов ГИС (рис. 2):

- кавернометрия,
- гамма-метод,

- азимутальный литоплотностной метод,
- нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам,
- многозондовый индукционный каротаж,
- ядерно-магнитный каротаж,
- акустический широкополосный каротаж.



ВЗД – винтовой забойный двигатель

НУБТ – немагнитная утяжеленная бурильная труба

Рис. 2. Схема компоновки аппаратуры записи LWD компании Weatherford [2] с дополнениями авторов

ГИС после бурения выполнены аппаратным комплексом Platform Express (PEX) от компании Schlumberger.

Сегодня каротаж в процессе бурения позволяет регистрировать практически весь спектр петрофизических параметров, которые можно получить при исследованиях на кабеле. Исключением является многочастотный волновой диэлектрический каротаж.

Данный факт ставит технологию LWD в один ряд с каротажем на кабеле по разнообразию спектра услуг.

Результаты и обсуждения

Сопоставимость исходных данных ГИС (методы оценки пористости и сопротивления)

При проектировании приборов каротажа во время бурения, эталоном для инженеров выступают данные ГИС, записанные на геофизическом кабеле, и результаты лабораторных исследований образцов кернового материала. В данном случае, помимо точного метрологического обеспечения оборудования, степень корреляции геолого-

геофизической информации, полученной различными способами, определяет их объективность, а соответственно, и применимость приборов LWD.

В работе рассмотрена геолого-геофизическая информация, полученная из скважин с S-образной траекторией, что говорит о вертикальном вскрытии пласта.

Авторами были построены гистограммы и кросс-плоты корреляции параметров гамма-гамма плотностного каротажа и нейтронного каротажа (НК), регистрируемых приборами каротажа (рис. 3, 4). Изначально, петрофизическое обеспечение интерпретации данных ГИС основано на разведочных скважинах, где каротаж проведен на кабеле и включает в себя всю линейку методов электрометрии (ВИКИЗ – высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование, БКЗ – боковое каротажное (или электрическое) зондирование, БК – боковой каротаж, ИК – индукционный каротаж), а также выполнен отбор и исследования кернового материала в максимально возможном объеме.

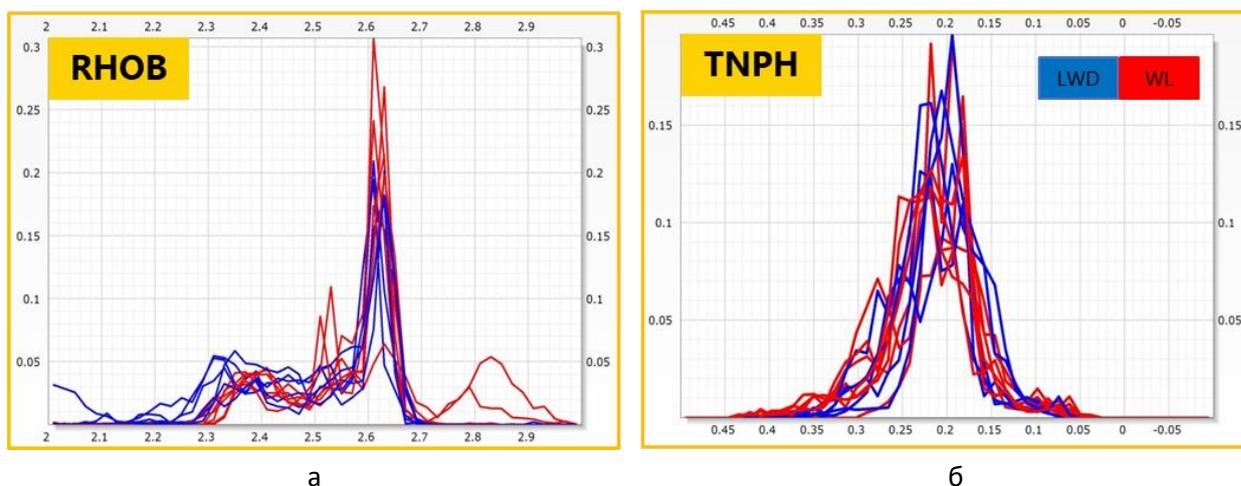


Рис. 3. Гистограммы распределения данных, записанных приборами на кабеле и в составе КИБК: а) ГГКп (RHOV); б) НК (TNPH)

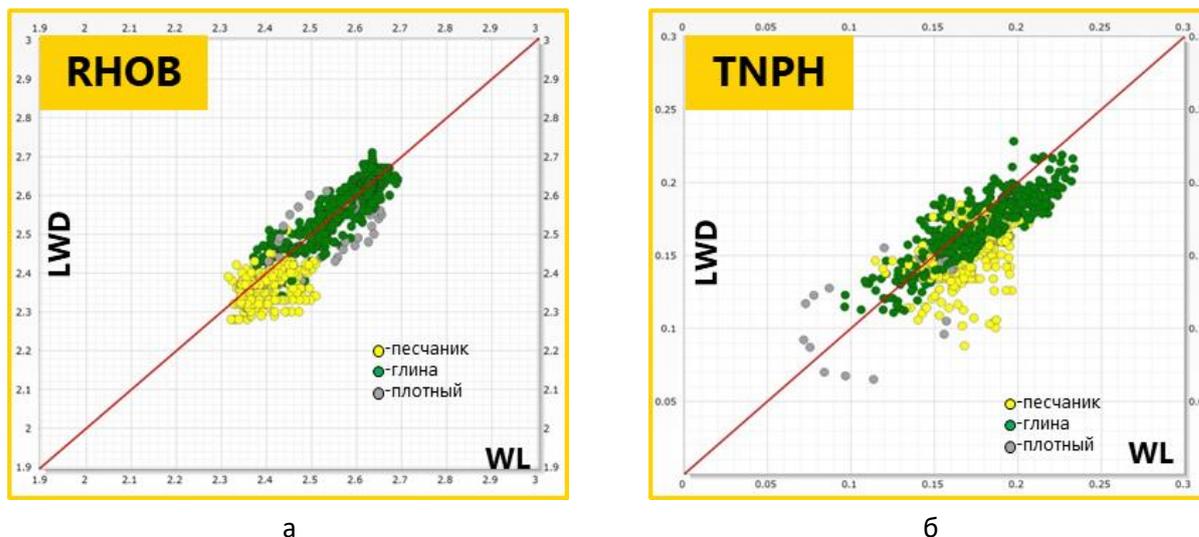


Рис. 4. Сопоставление данных, записанных приборами на кабеле и в составе КНБК:
а) ГГКп (RHOv); б) НК (TNPH)

Временные изменения около-скважинного пространства оказывают влияние на показания геофизических приборов. Так, газ, выделяющийся в процессе бурения, в той или иной степени искажает данные, регистрируемые методами ГГКп и НК. Не исключается влияние на результаты ГИС, вызванное разницей в мощности радиоактивных источников в приборах, а также различной скоростью бурения (при LWD).

Существующее занижение показаний по каротажу во время бурения связано с более выраженным влиянием подвижного газа на этапе вскрытия пласта. Учитывая данный факт, в отдельных случаях была проведена нормировка к каротажу на кабеле, как менее подверженному искажению данных.

До проведения записи зондов электрометрии осуществлялась проверка каждого прибора на метрологическую пригодность. На этапе обработки и интерпретации данных электрометрии оценивалось качество их записи путем

анализа сходимости данных в мощных опорных глинистых интервалах.

В случае расхождения данных LWD и WL, при определении удельного электрического сопротивления УЭС пласта отдавалось предпочтение данным каротажа, записанного в процессе бурения, в связи с незначительным радиусом проникновения фильтрата бурового раствора в пласт (рис. 5).

Предельный радиус исследования приборами WL составляет 1,5–2,0 м, что соответствует диаметру зоны проникновения, подвергающему регистрируемые данные влиянию сопротивления бурового раствора. При строительстве скважин на рассматриваемом участке использовался полимер-коллоидный раствор, успешно применяемый в разведочном и эксплуатационном бурении.

УЭС пласта, фиксируемое приборами LWD, минимально подвержено искажению сопротивлением бурового раствора как за счет времени между вскрытием пласта и проведением каротажа, так и за счет технических характеристик [4, 5] (см. рис. 5б, табл. 2).

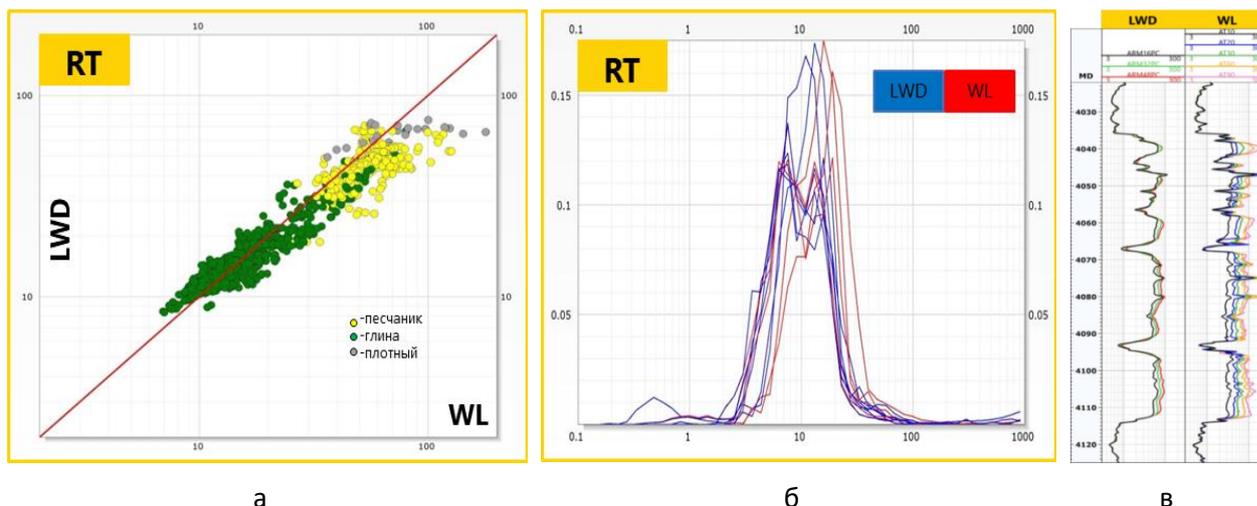


Рис. 5. Сопоставление данных методов оценки УЭС (RT): а – кросс-плот; б – статистическое распределение; в – каротаж

Таблица 2

Технические характеристики приборов каротажа

Параметр	AIT (после бурения)	MFR (в процессе бурения)
Вертикальное разрешение	0,30; 0,61; 1,22 м	1,0; 1,5 м
Радиус исследования	1,5–2 м (по дальнему зонду)	0,8 м (по дальнему зонду)
Диапазон измерения	0,1–2000 Ом	0,1–3000 Ом

Сопоставление эффективных толщин и ФЕС

Различия в характеристиках приборов (разрешающая способность, мощность источника и радиус исследования каротажа) влекут за собой различную детальность расчленения разреза на литологические разности, несмотря на использование единых методических подходов при интерпретации каротажных диаграмм (рис. 6).

Несмотря на это, наблюдается хорошая сходимость суммарных мощностей по скважинам (рис. 7).

В целом, введя все необходимые поправки в методы ГИС, записанные разными приборами, можно отметить хорошую сходимость полученных ФЕС.

Отмечается отсутствие систематических отклонений параметров, регистрируемых приборами каротажа на кабеле, относительно LWD, а имеющиеся расхождения находятся в пределах допустимых погрешностей (рис. 8).

Наименьшее расхождение получено при сопоставлении коэффициента пористости по данным LWD и WL с данными ядерно-магнитного каротажа и керна. Величина отклонения в пределах анализируемых эффективных толщин не превышает $\pm 2\%$, что допустимо при оценке ФЕС пласта в рамках интерпретации и подсчета запасов углеводородов.

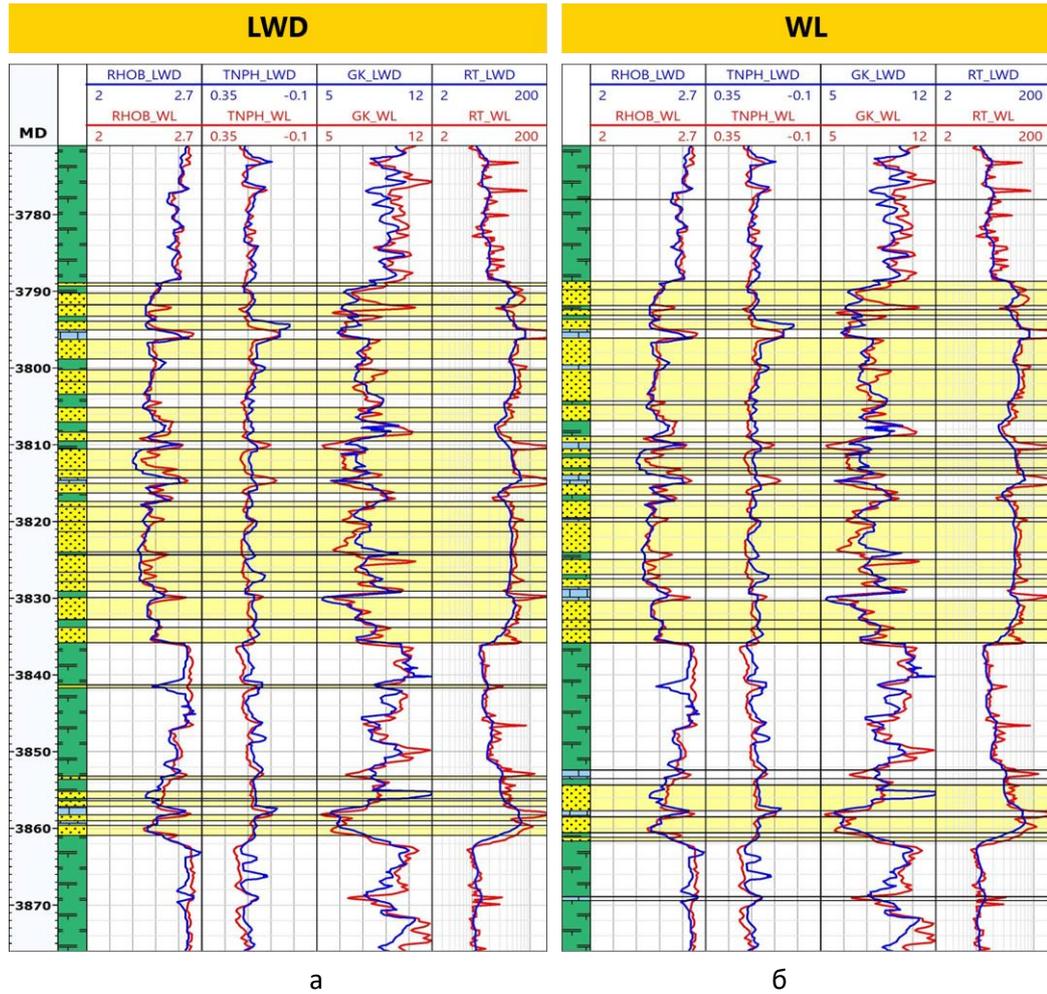


Рис. 6. Сопоставление результатов интерпретации данных:
а) WL; б) LWD

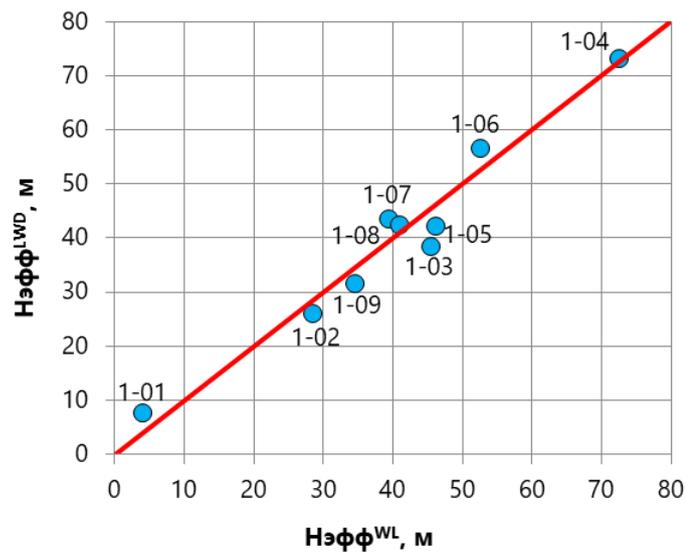


Рис. 7. График сопоставления эффективных толщин

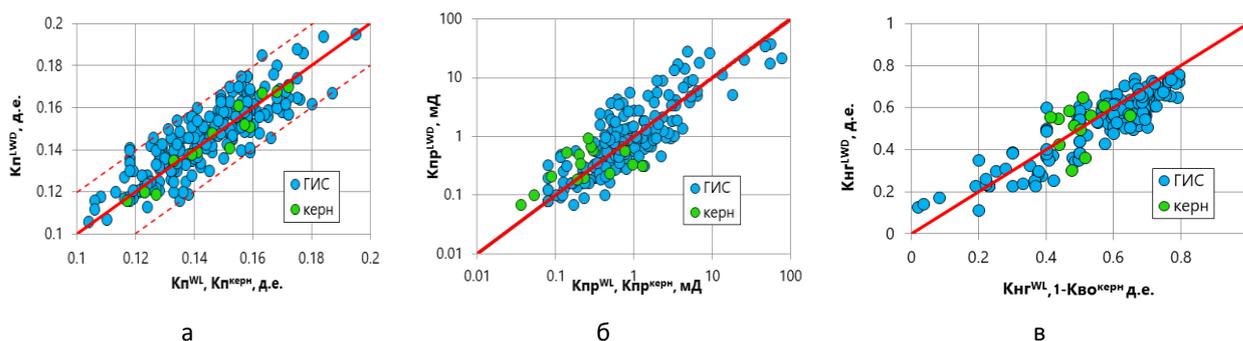


Рис. 8. Графики сопоставления результатов определения ФЕС по LWD с данными WL и керна: а) K_p (коэффициент пористости); б) $K_{пр}$ (коэффициент проницаемости); в) $K_{нг}$ (коэффициент насыщенности)

Наблюдается небольшое занижение коэффициента водонасыщенности по данным LWD относительно WL, что, согласно теории, обусловлено вертикальной разрешающей способностью приборов.

Анализ вышесказанного позволяет сделать вывод, что данные каротажа в процессе бурения и традиционного каротажа сопоставимы, благодаря чему могут использоваться для определения параметров пласта.

Имеющиеся расхождения обусловлены временными изменениями околоскважинного пространства, такими как кавернообразование, проникновение фильтрата бурового раствора в пласт, а также вертикальной разрешающей способностью методов ГИС.

Экономический эффект

Анализ результатов применения каротажа в процессе бурения показывает, что данная технология способствует сокращению времени на строительство скважины.

На рассматриваемом месторождении выявлено, что путем исключения из процесса части спуско-подъемных операций и проведения каротажа на кабеле заказчик может сэкономить от 1 до 2,5 суток в зависимости от траектории бурения и скважинных условий.

На строительство скважины исследуемого объекта, вместе с проведением ГИС, начиная с бурения направления и заканчивая спуском обсадной колонны, уходит около 15 суток (рис. 9а) [4].

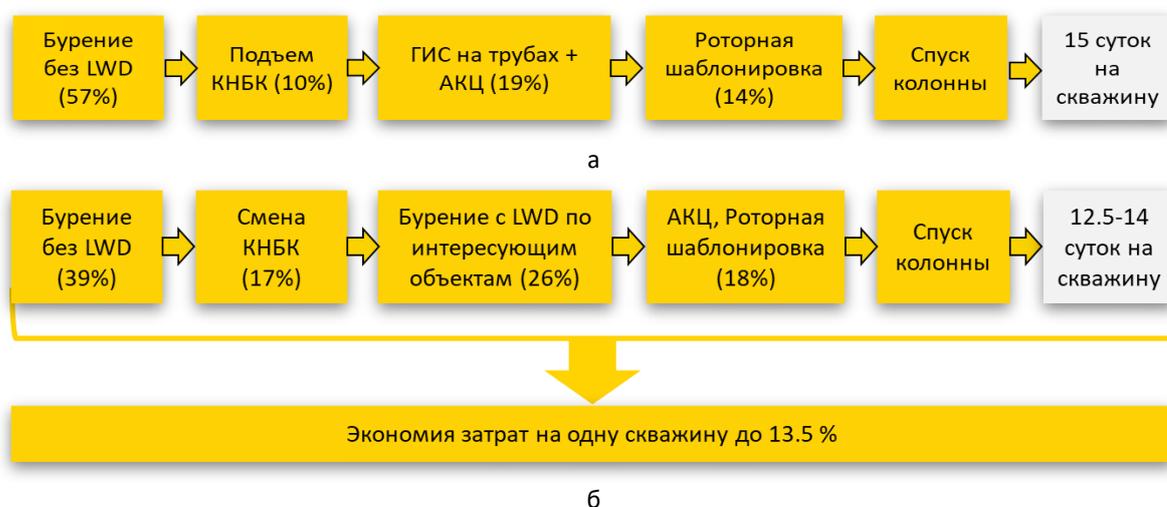


Рис. 9. Экономическая эффективность каротажа в процессе бурения: а) без использования технологии LWD; б) с использованием технологии LWD

Используя технологию LWD, в зависимости от траектории скважины, можно сэкономить до 2,5 суток (рис. 9б).

Учитывая затраты на каждую скважинную операцию и несмотря на высокую стоимость проводимого каротажа, процент экономии в денежном эквиваленте составляет до 13,5%.

Заключение

Прогрессирующие наклонно-направленное и горизонтальное бурение требуют внимания не только к сервису забойных двигателей, роторно-управляемым системам, но и, прежде всего, к оборудованию для телеметрии и каротажа в процессе бурения.

Приборы LWD совершенствуются, повышается точность результатов измерений, стремительно развивается геонавигация.

Литература

1. *Медведев Н.В.* Российский рынок сопровождения горизонтального и наклонно-направленного бурения: текущее состояние и перспективы развития до 2025 года // *ROGTEC Российские нефтегазовые технологии.* 2017. № 47. С. 14–23. <https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2016/12/01-MWD-LWD-In-Russia-Current-Status-and-Development-Outlook-Through-2025.pdf> (Дата обращения 20.09.2021).
2. *МакКей М., Шайхутдинов С., Вагнер К.* и др. Технология за круглым столом КВБ // *ROGTEC Российские нефтегазовые технологии.* 2012. № 30. С. 16–37. https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/09/02_LWD-logging-while-drilling-Baker-Hughes-weatherford-Halliburton-schlumberger-ge-oil-gas-downhole-tools.pdf (Дата обращения 20.09.2021).
3. *Нестеров С.В., Кожяев Д.П.* Применение LWD с экономическим эффектом // *Молодой ученый.* 2018. № 23(209). С. 221–224. <https://moluch.ru/archive/209/51265/> (Дата обращения: 20.09.2021).
4. *Петрофизика (LWD) // Weatherford.* <https://www.weatherford.com/ru/products-services/drilling-formation-evaluation/drilling-services/lwd-petrophysics.html> (Дата обращения 20.09.2021).
5. *Приборы для оценки фильтрационно-емкостных свойств пластов-коллекторов // Schlumberger.* https://www.slb.ru/services/wireline/open_hole/petrophysics-oh-tools/ (Дата обращения 20.09.2021).

Анализируя геолого-геофизическую информацию, полученную различными методами, можно сделать вывод о том, что качество данных, получаемых в процессе бурения сопоставимо с материалами традиционного каротажа при условии вертикального вскрытия пласта.

Как показывают проведенные авторами исследования, выделение эффективных толщин и оценка подсчетных параметров пласта на основе материалов каротажа в процессе бурения является возможной и достоверной.

При известном плановом количестве опорных скважин, проведение каротажа в процессе бурения не только ускорит процесс строительства, но и обеспечит специалистов надежной базой для оценки фильтрационно-емкостных свойств и подсчета параметров флюида.

Logging while drilling – efficient time management and reliable base for estimating volumetric parameters of a reservoir

A.V. Novikov, D.N. Gubinsky, E.A. Zaray

Tyumen Petroleum Research Center LLC, Tyumen, Russia

E-mail: avnovikov10@tnnc.rosneft.ru

Abstract. The relevance and economic efficiency of the technology of recording geophysical parameters while drilling are shown. A comparative analysis of the input geophysical data recorded while and after drilling in directional wells is carried out. The main conclusions from the analysis of reservoir properties and net pays identified based on wireline logging (WL) and logging while drilling (LWD) data are presented.

Keywords: wireline logging, logging while drilling, well logging data interpretation, petrophysics, drilling, geosteering, reservoir properties, reservoir.

Citation: *Novikov A.V., Gubinsky D.N., Zaray E.A.* Logging while drilling – efficient time management and reliable base for estimating volumetric parameters of a reservoir // Actual Problems of Oil and Gas. 2021. Iss. 3(34). P. 49–60. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art4> (In Russ.).

References

1. *Medvedev N.V.* MWD & LWD in Russia: current status and development outlook through 2025 // ROGTEC Russian Oil and Gas Technologies Magazine. 2017. No. 47. P. 14–23. <https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2016/12/01-MWD-LWD-In-Russia-Current-Status-and-Development-Outlook-Through-2025.pdf> (Accessed on 20.09.2021).
2. *MacKay M., Shaikhutdinov S., Wagner K.* et al. Technology roundtable: LWD // ROGTEC Russian Oil and Gas Technologies Magazine. 2012. No. 30. P. 16–37. https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/09/02_LWD-logging-while-drilling-Baker-Hughes-weatherford-Halliburton-schlumberger-ge-oil-gas-downhole-tools.pdf (Accessed on 20.09.2021).
3. *Nesterov S.V., Kozhaev D.P.* Application of LWD with economic effect // Young Scientist. 2018. No. 23(209). P. 221–224. <https://moluch.ru/archive/209/51265/> (Accessed on 20.09. 2021). (In Russ.).
4. Petrophysics (LWD) // Weatherford. <https://www.weatherford.com/ru/products-services/drilling-formation-evaluation/drilling-services/lwd-petrophysics.html> (Accessed on 20.09.2021). (In Russ.).
5. Devices for assessing the reservoir properties of reservoirs // Schlumberger. https://www.slb.ru/services/wireline/open_hole/petrophysics-oh-tools/ (Accessed on 20.09.2021). (In Russ.).