

РАСШИРЕННЫЕ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН: ПЕРВЫЕ СРЕДИ РАВНЫХ

Т. Лоерманс

Excellence Logging – EXLOG, Париж, Франция

E-mail: ton_loermans@hotmail.com

Технологии геолого-технических исследований скважин (ГТИ) стремительно развиваются в течение последних десяти лет. Традиционное ГТИ ранее носило только качественный характер, и диаграммы каротажа бурового раствора не могли использоваться для оценки петрофизических свойств скважины, которые являются основой для дальнейших работ в скважинах и на месторождениях. Однако расширенные ГТИ могут представлять количественную информацию: диаграммы каротажа с достоверностью, точностью и надежностью, такие как LWD (каротаж в процессе бурения) и WLL (каротаж на кабеле). Следовательно, в настоящее время существует три различных метода каротажных работ для оценки работы скважин, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы по конкретным аспектам: прикладные ГТИ, LWD и WLL.

Значительные успехи были достигнуты в газовом анализе бурового раствора и элементном анализе шлама. Газовый анализ бурового раствора может показать состав углеводородного флюида для некоторых компонентов с таким же качеством, как и PVT-анализ (анализ пластовых флюидов), следовательно, он не только может модифицировать программу выборки, которая до сих пор выполнялась только с LWD/WLL, но также позволяет проводить забойную систему контроля и управления параметрами бурения по свойствам флюида.

Элементный анализ шлама, например с применением рентгеновской люминесценции, обладает возможностями, значительно превосходящими метод спектроскопии, которые ранее были достигнуты с помощью инструментов LWD/WLL, и открывает более эффективные способы оценки пластов, особенно когда традиционные методы не соответствуют требованиям, например в нетрадиционных коллекторах.

В статье приводится обзор и конкретные примеры данных каротажных диаграмм расширенных ГТИ, из которых можно сделать вывод, что расширенные ГТИ можно считать «первыми среди равных».

Ключевые слова: геолого-технические исследования скважин, каротаж в процессе бурения, каротаж на кабеле, газовый анализ бурового раствора, элементный анализ шлама

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.11>

Для цитирования: Лоерманс Т. Расширенные геолого-технические исследования скважин: первые среди равных. *Георесурсы*. 2017. Т. 19. № 3. Ч. 1. С. 216-221. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.11>

1. Технология расширенных геолого-технических исследований

Несмотря на свою ценность, информация, содержащаяся в обычных каротажных диаграммах газового каротажа, была только количественной и просто не обеспечивала большую часть измерений, которые необходимы для полной оценки петрофизических свойств скважины. Однако теперь, когда ГТИ стало более усовершенствованным, существуют три группы методов, которые можно рассматривать для обычных программ оценки скважин: расширенные геолого-технические исследования (РГТИ), LWD (каротаж в процессе бурения) и WLL (каротаж на кабеле). Несмотря на ценность основополагающего комплекса работ по отбору керн и пробной эксплуатации, они не подходят для обычного применения во всех скважинах и пластах; многие измерения, для которых традиционно необходимы образцы для исследований, и, следовательно, керн, могут теперь выполняться с достаточной точностью и достоверностью на шламах и образцах пород, либо уже в операциях РГТИ на участке скважины, или в лабораториях.

Существует множество применений РГТИ для буровых целей, например, мониторинг операций, включая контроль качества химикатов бурового раствора, безопасность скважин и совершенствование буровых работ.

В настоящей статье основное внимание будет уделено аспектам оценки формирования РГТИ. На рисунке 1 (Loermans, Kimour et al., 2012, с изменениями), показан широкий обзор различных методов и их применение для обычных петрофизических интерпретаций. Далее в этой статье некоторые из этих измерений рассматриваются и иллюстрируются примерами.

Причины включения РГТИ в оценочную программу можно сгруппировать по трем категориям: (i) TINA (нет альтернативы), то есть LWD и WLL просто не могут быть выполнены или не могут обеспечить необходимой информацией; (ii) VOI (ценность информации)/второе независимое мнение, когда РГТИ будет одним из, по крайней мере, двух полностью независимых методов оценки в целях уменьшения неопределенности от наличия только одного несовершенного метода; и (iii) Деньги, то есть наиболее дешевый из нескольких технически приемлемых методов или ситуаций, когда требуется уравнивание затрат и операционных рисков, включая контроль за скважинами и другие вопросы безопасности.

1.1 Нет другой альтернативы, кроме РГТИ

Существуют ситуации, когда только РГТИ может предоставить информацию. Когда в заброшенных скважинах доступен шлам, анализ шлама РГТИ может дать очень полезную информацию; для новых скважин – в

	gas chromatogr.	mass spectr.	POPI	fluid inclusions	isotope logging	LIBS	XRD	XRF	FTIR	spectral GR	"conv." core anal.	mini por. gr. dens	cutt. cap crvcs	x ray ct scanning	rock typing	IFP percut	AGIP perm on cuttings	NMR on cuttings	sonic on cuttings	micro mud losses	image anal./PNM	nano indent.	drilling param.
net reservoir ind.	x				x					x					x	x	x	x	x	x			x
fluid contacts	X	X	x	x	x													x					
fluid type	X	X	x	X	x													x					
fluid composition					x																		
fluid properties	x	X	x	x	x													x					
mineralogy						x 4)	X	X	X	x				x	x					x			x
elemental comp.								X	X	x													
correlation steering					x	X		X	X	x													
bulk density											X	x		X						x			x
grain density						x					X	x			x								
porosity											X	x	x	X **)	x	x	x	x	x		x		x
electr. params ***)															X						x		
pore size distr																							
Swi													X		X			X				x	
cap curve													X		X			x				x	
saturation, Sh				x									x *)										
perm. - matrix													x		x	X	X	X			x	x	
perm. - fract./high k rel.perms																					X		
vp/vs															x							x	
mechanical param.															X							X	x

Рис. 1. Обзор измерений РГТИ. *) если есть контакт и первичные условия; **) если известна плотность матрицы; ***) m , n , Q_v .

условиях бурения с отсутствием возможности применения инструментов LWD и WLL, например, из-за диаметра скважины, температуры и/или давления. Кроме того, как бы ни был хорош элементный анализ, который может быть получен из доступных инструментов спектроскопии LWD/WLL, эти измерения просто не соответствуют тому, что может быть получено, например, из рентгеновской флуоресценции, как части системы РГТИ. Очевидно, что любые новые методы, такие как анализ суммарного содержания органического углерода, произошедший из существующих лабораторных методов, могут быть перенесены в разработку РГТИ намного быстрее и дешевле, чем в WLL и LWD.

1.2 Ценность информации – второе независимое мнение

Наши каротажные диаграммы и методы оценки не являются совершенными, не обеспечивают 100% определенность в принятии решения по полученной из них информации. Анализ дерева принятия решений, использующихся в теореме Байеса, показывает, что для того, чтобы иметь любую желаемую определенность, требуются два независимых метода. Несмотря на годность наших интерпретаций диаграмм каротажа, при использовании только одного из трех методов РГТИ, LWD или WLL, они иногда не могут рассматриваться иначе, чем на основе только одной серии действительно независимых наборов информации. Несмотря на то, что, конечно, одним из основных факторов в области развития технологии LWD и WLL за последние десятилетия было предоставление действительно независимых методов,

например испытание давления пласта и отбор проб для подтверждения интерпретаций, основанных на каротажных диаграммах удельного сопротивления/плотности, мы должны оставаться в курсе потенциальных пределов наших источников данных.

Даже идеальный график измерения пластового давления может вводить в заблуждение.

Чтобы еще раз подтвердить, что даже наши самые надежные инструменты не достоверны на 100%, рассмотрим рисунок 2, на котором показан первый набор точек давления, полученных при работе с нормальным пластовым давлением в оценочной скважине на выработанном участке. Начальная интерпретация участка скважины, основанная на ранее проводившихся исследованиях удельного сопротивления/плотности/нейтронного каротажа, была связана с ГВК (газоводяным контактом) при УНКД (уровне нулевого капиллярного давления) около 2984 м. Все точки давления имели хорошую мобильность при просадке, поэтому их можно было считать надежными. Следовательно, этот столб флюида (зеленым – газ, синим – вода), как показано слева от этого участка, вполне мог быть окончательным. Однако после того, как было проведено еще несколько испытаний пластового давления (не представлено на этом графике), и были взяты образцы флюида и боковых стенок, прочно установилась интерпретация, изображенная с правой стороны, с приблизительно 45.72 м дополнительного столба УВ, включая нефтяную оторочку (красным)¹.

¹Количественное объяснение для этого случая еще не найдено

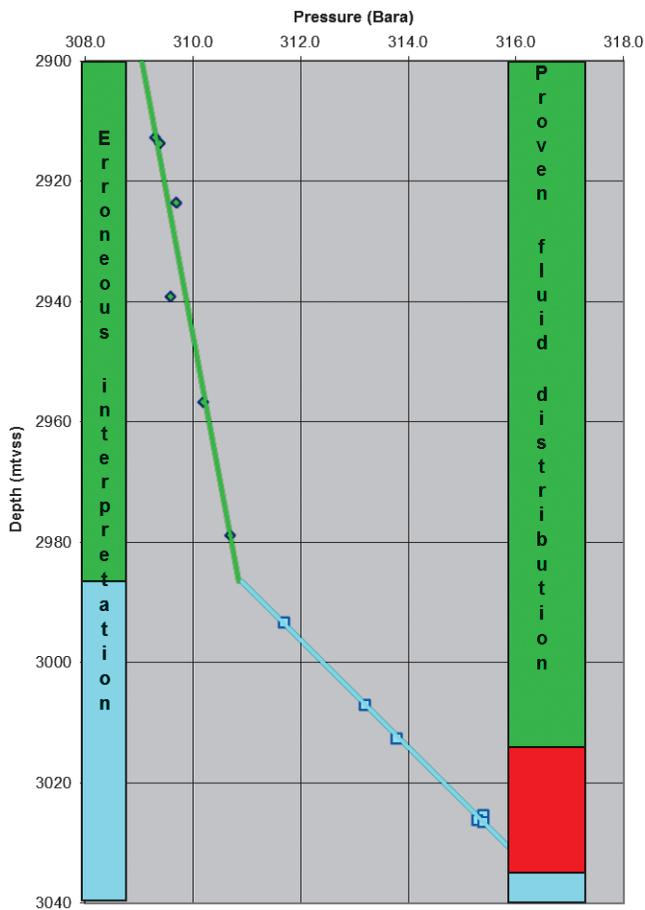


Рис. 2. Даже графики пластового давления могут вводить в заблуждение

1.3 Экономия затрат

Когда доступно два метода, обеспечивающих технически достаточно приемлемую и эквивалентную информацию, то есть включающих достаточную определенность в том, что не требуется «второго мнения», то, очевидно, должна быть принята альтернатива с наименьшими затратами с точки зрения прямых расходов на приобретение данных и взвешенных рисков, связанных с альтернативами.

Сравнение спектрального гамма-каротажа на рисунке 3 показывает, что РГТИ теперь находится² в позиции, где был метод LWD в 1990-х годах: доступны многие измерения, но только от нескольких сервисных компаний, и эти каротажные диаграммы обычно не признаются и не принимаются всеми операторами/нефтяными компаниями из-за их качества и коммерческой ценности.

Заменяемые методы для некоторых измерений обычно используются, когда желаемое измерение не может быть получено, то есть заменяемый метод принимается как можно более практически возможным. Однако, когда снижение стоимости очень важно, то есть когда методы оценки чрезвычайно хорошо установлены, в ходе массового эксплуатационного бурения могут быть рассмотрены даже простые недорогие заменители для простых каротажных диаграмм. Рассмотрим рисунок 4, из которого очевидно, что ROP (диаграмма скорости проходки скважины) даже при почти нулевых дополнительных затратах, может служить заменителем для GR(ГК), тем самым сохраняя

² Многие подобные примеры были опубликованы уже более пяти лет назад, например презентация (Marsala et al., 2011)

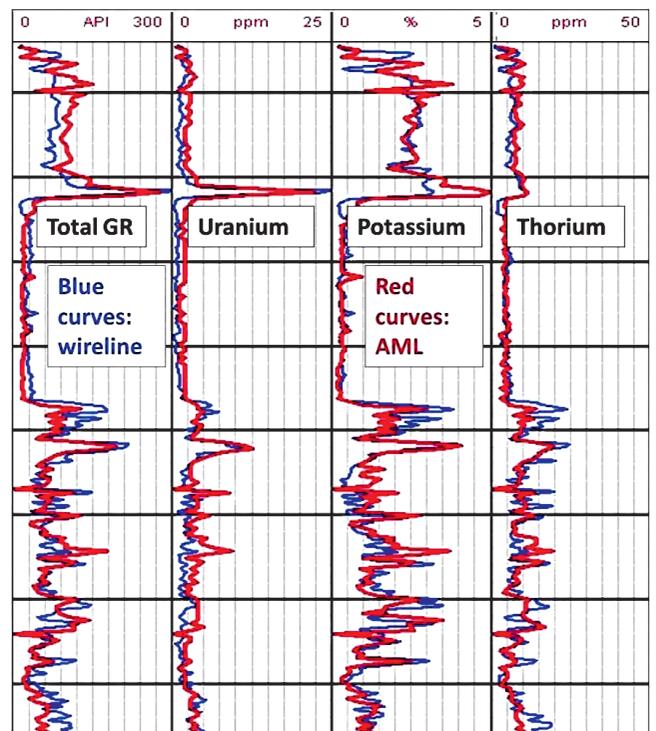


Рис. 3. Эквивалентность РГТИ и WLL спектральным кривым GR(ГК)

небольшие дополнительные затраты от MWD-GR.

Помимо простого недорогого заменителя для некоторых других каротажных диаграмм, ROP может быть индикатором механических свойств. То есть, несмотря на то, что метод ROP является сырым сам по себе, он значительно превосходит модифицированную d-экспоненту средней удельной энергии (MSE), необходимой для бурения образца породы. Такой показатель MSE является очевидным потенциальным заменителем некоторых параметров

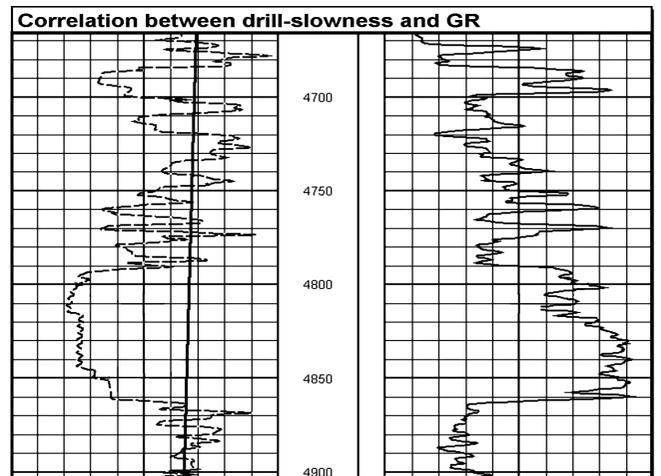


Рис. 4. ROP как возможный малозатратный заменитель GR(ГК). Две основные кривые, показанные на этом графике, представляют собой GR(ГК) и ROP. Тем не менее, масштаб не показан специально, так как каждая из этих кривых может отображаться нетрадиционным образом, например, GR (ГК) может отображаться на любом участке с измененными масштабами, не сплошной, а пунктирной кривой и с повторной выборкой из оригинала. Очевидно, что для всех практических целей кривые ROP и GR(ГК) взаимозаменяемы. Следовательно, если экономия затрат имеет значение, в таких случаях, как этот, можно было бы даже сэкономить на расходах на выполнение GR(ГК).

технической прочности горных пород, что, естественно, важно для определения способности разрыва пласта. А для нетрадиционных видов разработки (сланцы) ГРП все еще остается основным способом оценки скважины.

2. Глубина имеет значение

Глубина является самым важным параметром каротажа, и, следовательно, фактор глубины также важен для РГТИ. Многие РГТИ не удовлетворяют требованиям из-за различных проблем, связанных с глубиной выборки и разрешения РГТИ в частности. Тем не менее, как станет ясно далее, проблема глубины для РГТИ меньше, чем кажется и не сильно отличается от аналогичных проблем с кривыми LWD и WLL, и даже в некоторых моментах фактически РГТИ может иметь дополнительные преимущества.

Глубина, соответствующая различным кривым РГТИ на одну общую стандартную глубину РГТИ, и последующее сопоставление кривых РГТИ с кривыми LWD и/или WLL не отличается от сопоставления разных кривых WLL или LWD друг другу. В любой операции геолого-технических исследований скважин глубины для измеряемых параметров бурения должны быть сопоставлены с глубинами, отсчитываемыми из показаний газового каротажа и шлама, поступающих на поверхность. В то время как точные механизмы такого процесса, разумеется, различны для соответствующих кривых WLL и LWD, особенно, как показали многочисленные примеры, время выноса бурового шлама к устью скважины должно быть точно определено, что является нормальной практикой, то сопоставление глубины различным кривым не является проблемой.

Смешивание бурового раствора, особенно когда имеется много промывок, может влиять на плавный перенос шлама, и, таким образом, отрицательно сказывается на разрешении по глубине, получаемое из образцов шлама. Но, когда гидравлика бурения хорошая, что, конечно, лучше для процесса бурения и очистки отверстий, вполне возможно получение образцов шлама с разрешением около 6 м. Также реакция с высоким разрешением, часто получаемая из показаний газа бурового раствора РГТИ, включая измерения изотопов, подтверждает, что смешивание бурового раствора и разрешение глубины не являются фундаментальной проблемой для ограничения применения РГТИ.

Учитывая, что для нескольких измерений РГТИ требуется только небольшое количество шлама, возможна ручная сборка шлама для особых случаев. Это означает, что, хотя даже у образцов керна могут быть измерены только средние свойства, например, для образца в несколько футов, состоящего из 5 мм слоев песка/сланца, РГТИ может отдельно измерять свойства этих тонких слоев песка и сланца.

Установление абсолютной точной глубины, то есть истинной глубины по длине скважины (TAH – True Along Hole), является проблемой, требующей дальнейшего усовершенствования. Абсолютные глубины WLL и LWD часто явно отличаются низким качеством; проблема озвучивается на многих конференциях, и предлагаются способы улучшения. В этом отношении РГТИ может помочь, особенно для бурильщиков, в вопросах глубины LWD. Из-за природы геолого-технического исследования скважины, почти неотъемлемой частью его

операций, даже больше, чем с LWD, является мониторинг и регистрация тех параметров, которые необходимы для определения истинной глубины по длине скважины, например трения бурильной колонны при движении по траектории скважины. Следовательно, учитывая, что РГТИ имеет операционную систему и вычислительную мощность на месте для выполнения операций, мы могли бы увидеть развитие, где истинная глубина по длине скважины, установленная службами РГТИ, фактически становится стандартной глубиной, что уже давно существует с глубиной предоставляемой по каротажу WLL как неоспоримой по умолчанию, с превосходным качеством по глубине бурения.

3. Газовый анализ бурового раствора

За последнее десятилетие был сделан огромный скачок в развитии газового анализа бурового раствора от слабо качественных до очень точных и надежных измерений с лучшими доступными системами РГТИ. На рисунке 5 показано идеальное совпадение между составом УВ (C1-C5), полученным в режиме реального времени с помощью системы РГТИ, а также результаты PVT-анализа (зависимости давление-объем-температура) на образцах пластового флюида WLL. С такой системой газа бурового раствора, пластовая жидкость LWD или WLL может быть оптимизирована и отрегулирована по мере необходимости. Иногда берут большее количество образцов и в других точках, чем ожидалось первоначально, и дальнейшая выборка LWD/WLL становится излишней. В целом, это, конечно, огромное преимущество для оценки скважины и пласта.

Таковыми же отличными могут быть измерения изотопов, что показано на рис. 6 для двух примеров, проведенных в режиме реального времени. Это делает возможным проведение забойной системы контроля параметров бурения на основе встречаемого состава УВ.

Этот шаг вперед в газовом анализе бурового раствора был возможен только путем согласованных усилий по каждой части цепи газового анализа. Отбор проб, т.е. извлечение газа из обратного потока бурового раствора, традиционно было самым слабым звеном в этой цепочке, и в наши дни все еще может им оставаться. Многие современные газовые системы РГТИ оснащены

AML gives real time, continuous, equivalent of PVT analysis of wireline fluid sample.

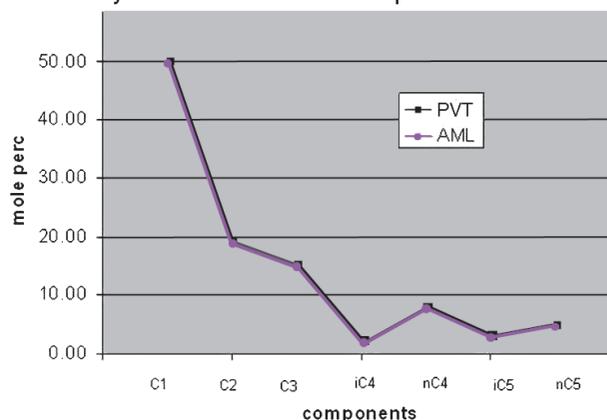


Рис. 5. Идеальное сопоставление состава УВ из РГТИ и образцов PVT-анализа

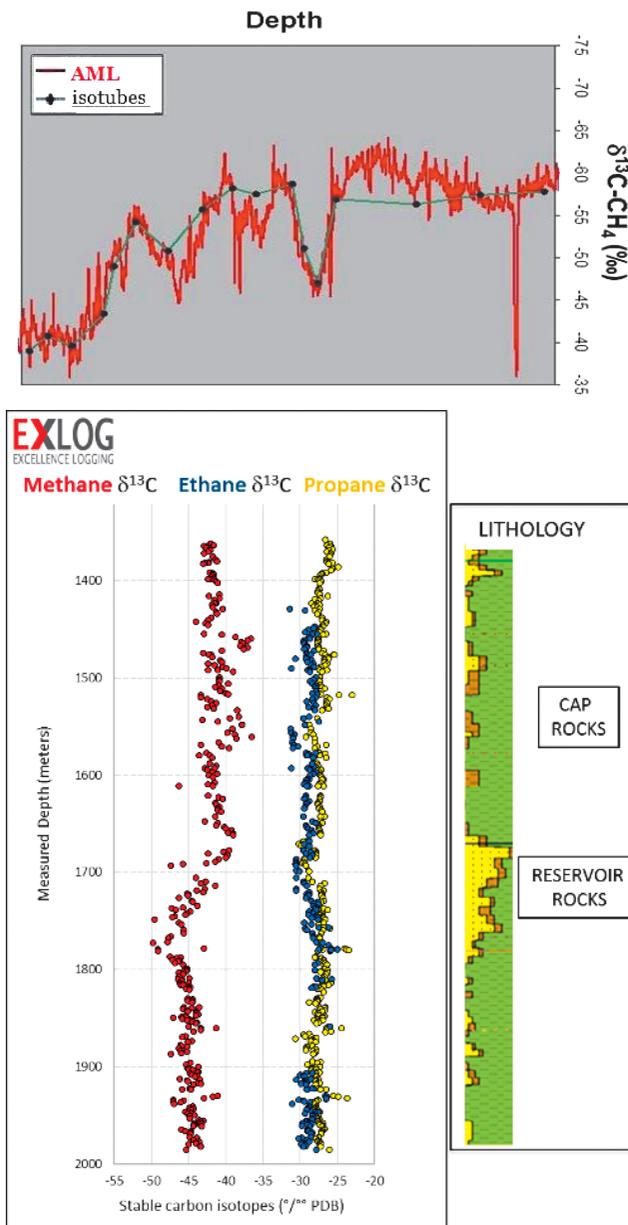


Рис. 6. Изотопный карттаж



Рис. 7. Собранная система анализа газа в буровом растворе. Зонд для отбора, а также вся система, являющаяся автономной, безопасна для непосредственного использования вблизи вибрационного сита или трубопровода

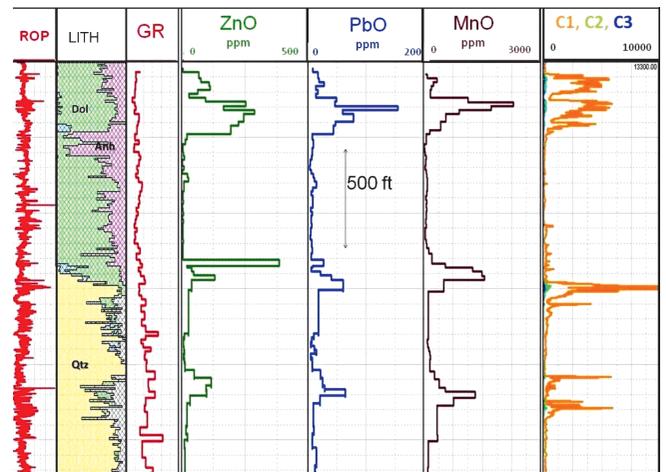


Рис. 8. Интересная корреляция некоторых микроэлементов из рентгеновской флуоресценции с газом бурового раствора (Marsala et al., 2011)

высокоэффективными газовыми хроматографами и масс-спектрометрами, расположенными в блоке бурового раствора, то есть на линии газа бурового раствора из вибрационного сита, или трубопровода/подроторной воронки, где расположена система отбора газа. Однако дальнейшее развитие системы анализа газа в буровом растворе (Рис. 7) исключило не только потребность в высокопроизводительном масс-спектрометре, но и обеспечило инкапсуляцию с уменьшением размера и взрывозащитой, устраняя необходимость в газовой линии.

4. Анализ рентгеновской флуоресценции и рентгеновской дифракции по шламу

Принято считать революцией в возможностях газового анализа бурового раствора то, что измерения шлама, подкрепленные анализом рентгеновской флуоресценции и рентгеновской дифракции, теперь возможны в блоках РГТИ по месту эксплуатации. Рентгеновская флуоресценция может определять точный элементный состав для Na и элементов с более высоким атомным номером, а рентгеновская дифракция обеспечивает анализ минералов. Огромный спектр элементов, предоставляемый рентгеновской флуоресценцией, в частности, обладает огромным потенциалом для оценок в ситуациях, когда традиционных методов просто недостаточно. На рисунке 8 Pb, Zn и Mn из рентгеновской флуоресценции, по-видимому, коррелируют с газовым анализом бурового раствора.

Вычисление спектрального GR(ГК) из анализа рентгеновской флуоресценции также хорошо устояло и доказано настолько, что нет необходимости в системах, в которых спектральный GR(ГК) измеряется напрямую, кроме случаев более низких эксплуатационных издержек, включая аспект, который нельзя недооценивать – отсутствие в потребности относительно тщательной подготовки проб, распыления и гранулирования, все еще необходимых для высококачественной рентгеновской флуоресценции. Кроме того, как и для прямого спектрального измерения GR(ГК) на шламах, для некоторых измерений ядерно-магнитного резонанса и импульсной нейтронной спектроскопии практически не требуется подготовка проб. С другой стороны, объем образцов, необходимых для рентгеновской флуоресценции, настолько мал, что, как упоминалось выше в пункте 2, возможен тщательный отбор и ручной сбор шлама для анализа.

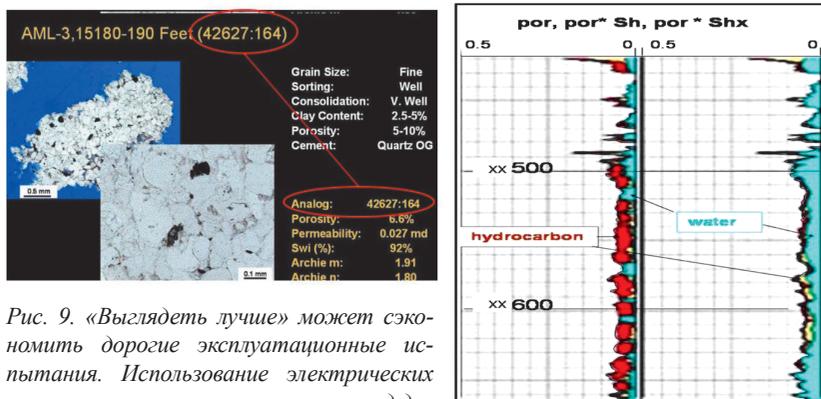


Рис. 9. «Выглядеть лучше» может сэкономить дорогие эксплуатационные испытания. Использование электрических параметров из каталога горных пород для соответствующих пород, а не только региональных знаний в этой области когда скважина была пробурена, изменяет оценку с газоносности на водоносность.

5. Другие измерения... «выглядящие лучше», возможно, самые важные?

В этой статье не обосновываются все другие измерения, доступные в настоящее время. Поэтому в качестве последнего примера может служить напоминание, что выражение «выглядеть лучше», можно сказать, является главной особенностью, позволяющей развиваться дисциплине.

Наиболее неразвитым элементом обычного каротажа бурового раствора было литологическое описание шлама. И на этом фронте РГТИ может также добиться большего успеха. На рисунке 9 вместо обычного условного литологического описания была выполнена классификация горных пород по типу в соответствии со стандартными схемами (Archie, всемирно известный своим уравнением насыщения, на самом деле также отлично выполнил классификацию пород, целью которой является сокращение количества необходимых лабораторных измерений). Затем

была сделана оценка по свойствам, полученным из каталога горных пород. В то время как типизация горных пород могла быть сделана в режиме реального времени на месте, к сожалению, этого не было сделано. Следовательно, для петрофизической оценки этой скважины использовались только общие параметры доступных знаний. В результате скважина была интерпретирована углеводородоносной, и поэтому было произведено пробное испытание, к сожалению, с добычей только воды. Как видно из оценки с параметрами, полученными по типизации пород, если бы для этой скважины было произведено РГТИ, возможно, сократились бы затраты на пробную эксплуатацию.

Литература

- Loermans, T., Bradford, C., Marsala, A., Kimour, F., & Bondabou, K. Successful Pilot Testing Of Integrated Advanced Mud Logging Unit. *SPWLA 53rd Annual Logging Symposium*. Cartagena, Colombia. Paper VVV. 2012.
- Marsala, A. F., Loermans, T., Shen, S., Scheibe, C., & Zereik, R. Real-time Mineralogy, Lithology, and Chemostratigraphy While Drilling using Portable Energy-Dispersive X-ray Fluorescence. *SPWLA Annual Conference*. Colorado Springs. Paper XXX. 2011. doi:10.2118/143468-MS

Сведения об авторе

Тон Лоерманс – Консультант
 Excellence Logging – EXLOG, Париж, Франция
 E-mail: ton_loermans@hotmail.com
 Тел: +31 6 383 77412/+32 477 8423 33

Статья поступила в редакцию 19.07.2017;
 Принята к публикации 10.08.2017;
 Опубликовано 30.08.2017

IN ENGLISH

AML (Advanced Mud Logging): First Among Equals

T. Loermans

Excellence Logging – EXLOG, Paris, France

Abstract. During the past ten years an enormous development in mud logging technology has been made. Traditional mud logging was only qualitative in nature, and mudlogs could not be used for the petrophysical well evaluations which form the basis for all subsequent activities on wells and fields. AML however can provide quantitative information, logs with a reliability, trueness and precision like LWD and WLL. Hence for well evaluation programmes there are now three different logging methods available, each with its own pros and cons on specific aspects: AML, LWD and WLL. The largest improvements have been made in mud gas analysis and elemental analysis of cuttings. Mud gas analysis can yield hydrocarbon fluid composition for some components with a quality like PVT analysis, hence not only revolutionising the sampling programme so far done with only LWD/WLL, but also making it possible to geosteer on fluid properties. Elemental analysis of cuttings, e.g. with XRF, with an ability well beyond the capabilities of the spectroscopy measurements possible earlier with LWD/WLL tools, is opening up improved ways to evaluate formations, especially of course where the traditional methods are falling short of requirements, such as in unconventional reservoirs. An overview and specific examples of these AML logs is given, from which it may be concluded that AML now ought to be considered as “first among its equals”.

Keywords: mud logging technology, AML, LWD, WLL, mud gas analysis, elemental analysis of cuttings

For citation: Loermans T. AML (Advanced Mud Logging): First Among Equals. *Georesursy = Georesources*. 2017. V. 19. No. 3. Part 1. Pp. 216-221. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.11>

References

- Loermans, T., Bradford, C., Marsala, A., Kimour, F., & Bondabou, K. Successful Pilot Testing Of Integrated Advanced Mud Logging Unit. *SPWLA 53rd Annual Logging Symposium*. Cartagena, Colombia. Paper VVV. 2012.
- Marsala, A. F., Loermans, T., Shen, S., Scheibe, C., & Zereik, R. Real-time Mineralogy, Lithology, and Chemostratigraphy While Drilling using Portable Energy-Dispersive X-ray Fluorescence. *Society of Petroleum Engineers. SPWLA Annual Conference*. Colorado Springs. Paper XXX. 2011. doi:10.2118/143468-MS

About the Author

Ton Loermans – Consultant, Excellence Logging – EXLOG, Paris, France, e-mail: ton_loermans@hotmail.com
 Tel: +31 6 383 77412 or +32 477 8423 33

Manuscript received 19 July 2017; Accepted 10 August 2017;
 Published 30 August 2017