

УДК 550.832.46

*Т. С. Попкова, Р. У. Исянгулов, И. А. Борискина**ОАО «Когалымнефтегеофизика»**Н. В. Козяр, А. С. Варыхалов**ООО «Нефтегазгеофизика»**Р. Р. Хафизов**ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»**А. А. Матковский**ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»*

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАРОТАЖА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ОБСАДНЫХ КОЛОНН

Описаны теория метода ультразвуковой цементометрии на отраженных волнах; технологии, применяемые для улучшения качества первичного материала при исследовании скважин; преимущества данного метода над стандартными методами интегральной акустики (АКЦ); используемая аппаратура. Рассмотрены практические примеры применения метода и сравнение со стандартными методами оценки качества цементирования.

Ключевые слова: ультразвуковая цементометрия, отраженный сигнал, акустический импеданс.

Введение

Цементное кольцо, создаваемое между обсадной колонной и стенкой скважины, должно обеспечивать гидроизоляцию пластов на протяжении всего периода эксплуатации скважины, так как от этого зависят ее экологические, технологические и экономические составляющие.

Акустический каротаж уже много лет используется для оценки качества сцепления цемента за колонной. Первые приборы и методы основывались на измерении амплитуды и времени первых вступлений продольной волны по колонне, распространяющейся от источника к приемнику. Излучатель и приемники были всенаправленными с частотой излучения примерно 20 кГц. Качество цементирования оценивалось по степени соответствия упругой волны, распространяющейся по обсадной колонне, нормальной волне, формирующейся

в волноводе (металлическая труба, окруженная жидкостью). Позже была установлена связь между прочностью цемента на сжатие и затуханием продольной волны по колонне.

Недостатком данного метода является невозможность разделения между собой таких дефектов цементного камня, как свободная колонна или микрозазор между колонной и цементом, канал в цементном камне или кавернозный цемент [1]. Ввиду большого количества неопределенностей АКЦ [3] для оценки герметичности затрубного пространства необходимо использовать дополнительные критерии, определенные с помощью математической статистики, что не всегда однозначно для близко расположенных коллекторов. Поэтому в последние годы возросло понимание важности применения ультразвукового акустического каротажа для качественной оценки сцепления цементного камня с колонной с целью исключения гидравлической связи между пластами разного насыщения.

Таким образом, задачей ультразвуковой цементометрии обсаженных скважин является уточнение результатов стандартной акустической цементометрии, а именно выявление типа дефектов цементного камня (продольных каналов и кольцевых зазоров) по всему периметру скважины, которые могут нарушать герметичность цементного кольца.

Методика и аппаратура

Принцип работы ультразвуковой цементометрии на отраженных волнах сочетает в себе два акустических метода: эхометод и реверберационный, которые в комплексе образуют эхореверберационный метод. Эхометод основан на регистрации эхосигналов от дефектов. Реверберационный (метод многократных отражений) основан на анализе времени объемной реверберации, то есть процесса постепенного затухания звука в некотором объеме объекта контроля [2].

Акустический сигнал излучается преобразователем, который совмещает в себе функции источника и приемника. Часть сигнала отражается от внутренней стенки колонны, а другая часть попадает в колонну и начинает многократно отражаться от ее стенок. Далее отраженный от внутренней стенки колонны и резонирующий внутри колонны сигналы попадают обратно в излучатель (рис. 1).

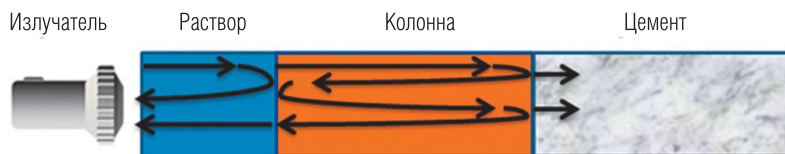


Рис. 1. Схема распространения акустического сигнала на отраженных волнах в обсаженной скважине

Сигнал акустического сканера состоит из отраженного от стенки скважины импульса (сигнал первого отражения), кратных отражений (сигнал реверберации) и шумов [5]. Каждая часть акустического сигнала содержит информацию о том или ином параметре среды, через которую он проходит, а именно:

- по времени прихода первого отражения и скорости упругих колебаний в промывочной жидкости рассчитываются радиусы внутренней стенки колонны;
- по амплитуде первого отражения строится имидж внутренней стенки колонны;
- ведущая частота реверберации (колебаний внутри колонны) зависит от толщины самой колонны;
- по относительной амплитуде сигнала и длительности многократных отражений в колонне можно определить, в каком состоянии находится цементное кольцо за колонной: в случае незацементированной колонны затухание амплитуд происходит медленно, а при наличии цемента за обсадной колонной сигналы затухают быстро вследствие улучшенной акустической связи между сталью и внешней средой (рис. 2). Отсюда получаем информацию об акустическом сопротивлении (импедансе) материала в затрубье.

В качестве аппаратуры ультразвуковой цементометрии в ОАО «Когалымнефтегеофизика» используется прибор АСТ-К-80-120/80, который предназначен для получения изображения стенки скважины, измерения внутреннего диаметра и толщины колонны, оценки распределения цемента вокруг колонны.

Для получения данных по периметру колонны реализована особая конструкция зондовой части. Она представляет собой сканирующую головку, которая непрерывно вращается вокруг своей оси со скоростью 2 об/с и содержит два независимых преобразователя с разными собственными частотами излучения – 1000 и 400 кГц.

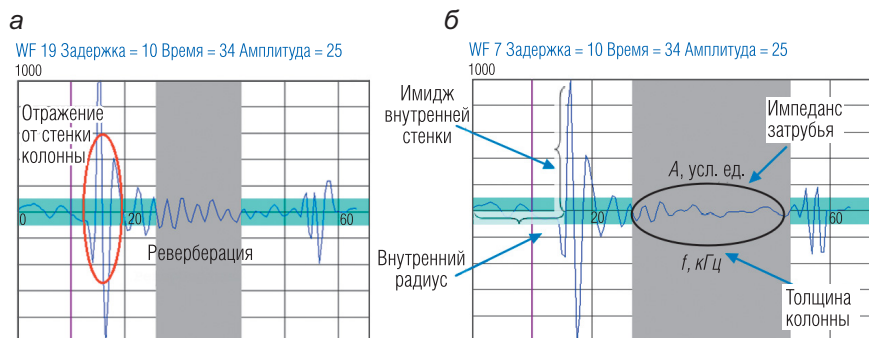


Рис. 2. Вид акустического сигнала: а – в интервале свободной колонны; б – в интервале зацементированного участка. В интервале свободной колонны амплитуды в окне реверберации (серый цвет) максимальны, в отличие от зацементированного участка

Возможность работы прибора на разных частотах делает его комплексным и позволяет решать разные задачи. Для получения детального изображения внутренней стенки колонны используется режим имиджера с рабочей частотой 1000 кГц, в котором производится 128 зондирований на один оборот. Для оценки качества цементирования (определения интервалов негерметичности цементного камня) и расчета толщины обсадной колонны используется режим сканера с рабочей частотой 400 кГц, в котором производится 30 зондирований за один оборот.

Комплект сменных быстроразъемных сканирующих головок с диаметрами 74 и 146 мм позволяет увеличить диапазон внутреннего диаметра и толщины колонны в исследуемых скважинах до 320 и 14 мм соответственно.

Для обеспечения центриции прибора внутри колонны используются жесткие регулируемые центраторы.

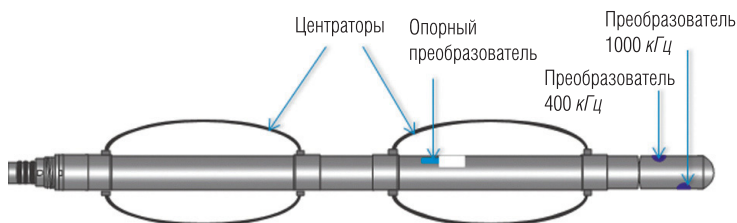


Рис. 3. Конструкция прибора АСТ-К-80-120/80

Практические примеры

Ниже приведены примеры использования методики ультразвуковой цементометрии в скважинах месторождений Западной Сибири.

Пример 1. На рис. 4 приведено сопоставление данных стандартных методов оценки качества цементирования (АКЦ, ГГЦ) с данными ультразвуковой цементометрии (УЗЦ) в эксплуатационной колонне диаметром 146 мм, в интервале утяжеленного цементного раствора плотностью 2 г/см^3 . Между рассмотренными методами наблюдается хорошая корреляция.

По данным ГГЦ интервал представлен плотным цементом с неоднородным характером заполнения затрубья ($\sim 1,95 \text{ г/см}^3$); по данным АКЦ – чередованием сплошного и частичного контакта цемента с колонной.

Метод ультразвуковой цементометрии выделяет интервалы хорошего качества цемента, которые совпадают с интервалами сплошного контакта по данным интегральной акустики, а в интервалах частичного контакта УЗЦ привносит качественно новую информацию: разделяет на участки кавернозного цемента и присутствия канала в цементном камне и выделяет даже отсутствие цемента.

Стоит обратить внимание на качество цементирования в пласте 1, где отмечается:

- частичный контакт по данным АКЦ;
- отсутствие цемента в интервале нефтеводонасыщенной части пласта 2474,5–2477 м, наличие канала в цементном камне в интервале водонасыщения 2482,5–2498,9 м по данным УЗЦ.

Из этого следует, что при опробовании кровли пласта 1 есть большая вероятность получить переток из водонасыщенных пропластков ввиду плохого качества цементирования.

Пример 2. На рис. 5 приведено сопоставление стандартных методов оценки качества цементирования, ультразвуковой цементометрии и спектральной шумометрии в интервале проектного пласта 2, выше которого расположен водонасыщенный пласт 1.

Как правило, для оценки качества цементирования колонны используют комплекс методов АКЦ, ГГЦ. Данная скважина не стала исключением. По данным метода АКЦ контакт цемент–колонна в интервале пласта 1 характеризуется как сплошной.

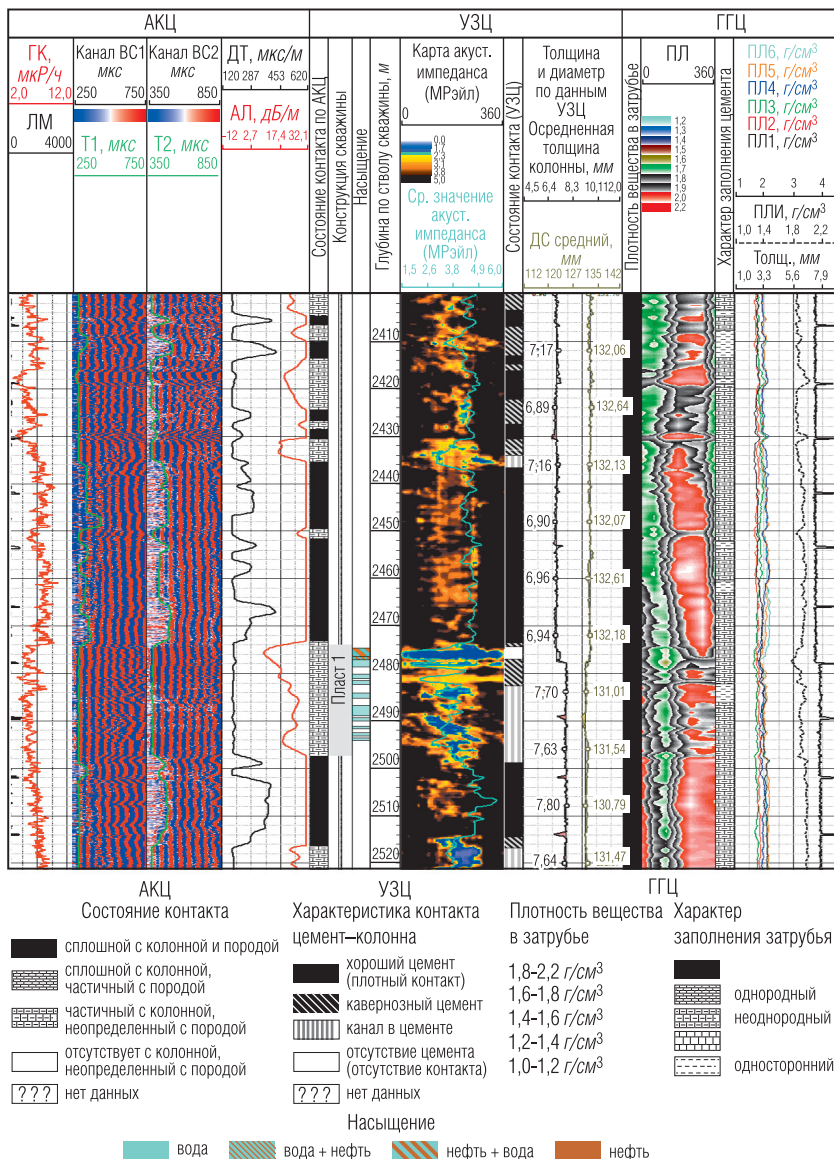
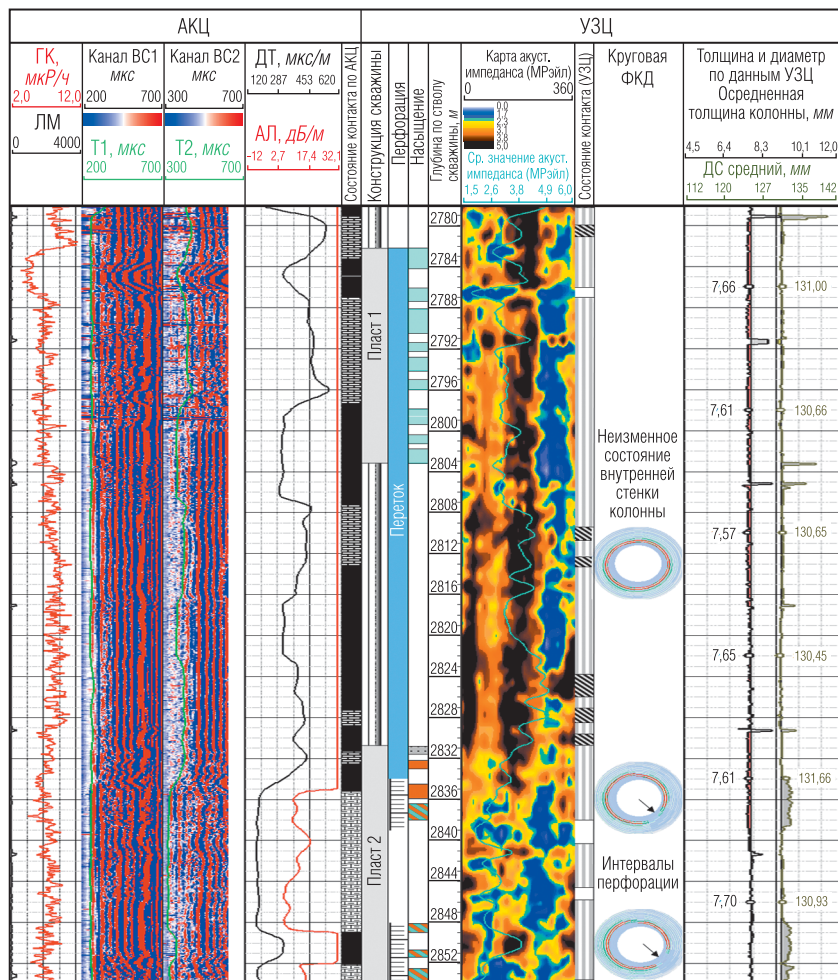


Рис. 4. Сопоставление данных стандартных методов оценки качества цементирования (АКЦ, ГГЦ) с данными ультразвуковой цементометрии, М 1:500



AKC		UZC	
Состояние контакта		Характеристика контакта цемент–колонна	
	сплошной с колонной и породой		хороший цемент (плотный контакт)
	сплошной с колонной, частичный с породой		кавернозный цемент
	частичный с колонной, неопределенный с породой		канал в цементе
	отсутствует с колонной, неопределенный с породой		отсутствие цемента (отсутствие контакта)
	нет данных		нет данных

Рис. 5. Сопоставление данных стандартных методов оценки качества цементирования (АКЦ, ГГЦ) с данными ультразвуковой цементометрии и данными спектральной шумометрии, М 1:200

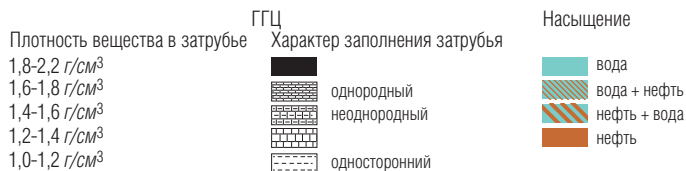
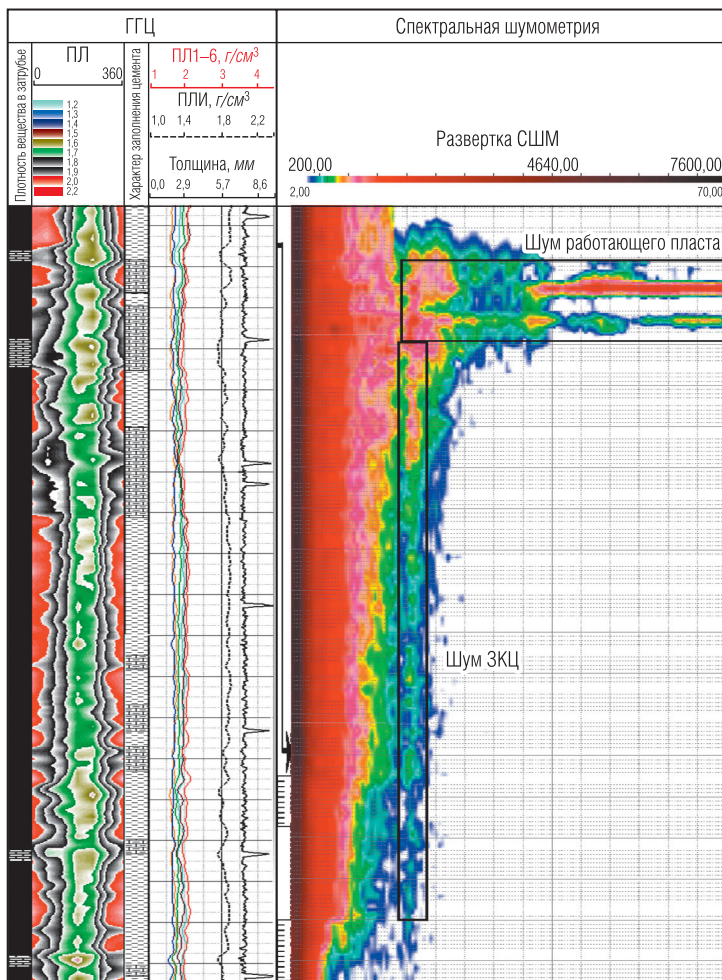


Рис. 5. Продолжение

По данным ГГЦ средняя плотность цемента равна $1,82 \text{ г/см}^3$, характер заполнения затрубья – неоднородный, односторонний. Как итог, качество цементирования, полученное в интервале пласта 1, можно отнести к хорошему.

Однако после вторичного вскрытия пласта 2 отмечалась высокая обводненность продукции. С целью уточнения источников обводнения были проведены исследования спектральной шумометрии и ультразвуковой цементометрии.

По данным спектрального шумомера определяется источник обводнения – вышележащий водонасыщенный пласт 1. По данным УЗЦ практически во всем интервале перетока отмечается канал в цементе, который является проводником воды и причиной высокой обводненности продукции из интервала перфорации.

Результат, полученный по УЗЦ, расходится с данными метода АКЦ, так как подобные каналы с угловым раскрытием $45\text{--}60^\circ$ недоступны для регистрации приборами АКЦ [4]. Данное утверждение иллюстрирует график зависимости коэффициента затухания от угла раскрытия вертикального канала в цементном кольце (рис. 6).

Приведенный пример также показывает, что метод УЗЦ включает в себя и оценку технического состояния колонны. В интервалах 2833,5–2838,5, 2847,6–2853,8 м отмечается увеличение внутреннего диаметра колонны вследствие изменения амплитуды и времени прихода отраженного сигнала (круговые ФКД, рис. 5, трек 12), связанное с интервалами перфорации.

Заключение

Приведенные примеры и суммарный опыт применения УЗЦ позволяют сформулировать следующие выводы:

- 1) данные УЗЦ хорошо коррелируют со стандартными методами оценки качества цементирования АКЦ, ГГЦ в интервалах сплошного контакта цементного кольца с колонной;
- 2) результатом обработки УЗЦ является детальная оценка состояния цементного камня за колонной по периметру 360° , что позволяет выделять каналы в цементном кольце даже с малым раскрытием;
- 3) метод позволяет получить развертку толщины и внутреннего диаметра колонны для проведения качественной оценки технического состояния обсадной трубы и выявления формы и размеров дефектов для планирования мероприятий по их ликвидации;

4) интегральный акустический метод АКЦ не позволяет выявить каналы в цементном кольце (при ширине угла раскрытия менее $45\text{--}60^\circ$), что снижает информативность данного метода;

5) многоколонная скважинная конструкция также является ограничением метода АКЦ. При наличии жесткого сплошного контакта внутренней колонны с цементом будет происходить интерференция волн от дальней колонны, в результате чего данные искажаются и качество цементирования внутренней колонны ошибочно занижается. На показания метода УЗЦ не влияет качество цементирования дальней колонны.

Метод ультразвуковой цементометрии дает подробный ответ на вопрос о качестве цемента за колонной, а также является инструментом верификации для последующего совершенствования технологии цементирования скважин в различных геолого-технических условиях.

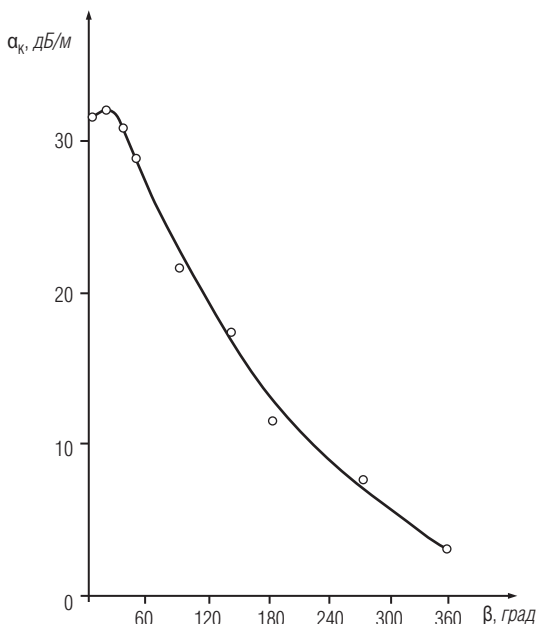


Рис. 6. Зависимость коэффициента затухания α_k от угла раскрытия вертикального канала в бездефектном цементном кольце плотностью $1,85 \text{ г/см}^3$ [6]. Значение α_k , равное границе между сплошным и частичным контактами, соответствует углу раскрытия 60°

ЛИТЕРАТУРА

1. *Варыхалов А. С., Мухин А. С., Рыбаков В. В., Буяльский М. Г. и др.* Аппаратурный комплекс для оценки технического состояния скважин // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 9 (267). С. 133–140.
2. *Ермолов И. Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 8 с.
3. *Коньсов А. К.* Проблемы акустической цементометрии // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2004. Вып. 7 (120). С. 144–154.
4. *Прямов П. А., Бернштейн Д. А., Гуфранов М. Г. и др.* Руководство по применению акустических и радиометрических методов контроля качества цементирования нефтяных и газовых скважин. Уфа: ВНИИНПГ, 1978. С. 35, 58.
5. *Смирнов Н. А., Варыхалов А. С., Мухин А. С., Пивоварова Н. Е.* Методическое руководство по применению аппаратуры акустического каротажа АСТ-К-80. Тверь: ООО «Нефтегазгеофизика», 2011.
6. *Сулейманов М. А., Служаев В. Н., Семёнов Е. В. и др.* Методическое руководство по компьютерной технологии контроля технического состояния и качества центрирования обсадных колонн нефтегазовых скважин. Уфа: АО НПФ «Геофизика». 1997. С. 34–35.

Рецензент канд. техн. наук А. В. Шумилов