

УДК 550.832.46

*Н. А. Смирнов, А. С. Варыхалов,
В. В. Рыбаков, Н. Е. Пивоварова
ООО "Нефтегазгеофизика"*

ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ОБСАДНЫХ КОЛОНН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

Показаны принципиальные особенности построения технологии акустического сканирования обсаженных нефтяных скважин. Основное внимание уделено техническим требованиям к элетроакустическому преобразователю сканера. Приведен пример определения дефектов цементирования обсадной колонны нефтяной скважины.

Ключевые слова: оценка качества цементирования скважины, акустическое сканирование, эхолокация.

Введение

Уже три десятилетия в мировой геофизической практике используется метод акустического сканирования для оценки качества цементирования нефтяных скважин [4, 7]. Этот метод стал рутинным у зарубежных фирм, однако российские сервисные компании до сих пор практически его не применяют. Публикации в НТВ "Каротажник" [1–3], посвященные ультразвуковым акустическим исследованиям, показывают, что внимание разработчиков метода направлено на решение задачи получения изображения стенки скважины (акустическое телевидение), называемой "проблемой первого отражения". Публикации, касающиеся измерения толщины обсадной колонны и плотности контакта колонны с цементным камнем ("проблема второго отражения"), отсутствуют. Предложенный в [1] способ измерения толщины обсадной колонны, заключающийся в вычислении полуразности между номинальным и измеренным внутренним диаметром колонны, не решает задачи, иначе надо признать, что коррозия существует только на внутренних стенках стальных труб. Наиболее трудная задача оценки контакта цементного камня с породой ("проблема третьего отражения") вообще не упоминается в отечественной печати. Именно малое количество отечественных исследований, свя-

занных с этим важным и полезным методом, является причиной его низкого рейтинга у российских сервисных компаний.

В отличие от акустического телевидения, занимающегося проблемой первого отражения, акустическое сканирование решает проблемы второго и третьего отражений. Различие в решаемых задачах обуславливает существенные различия в технических средствах, программном обеспечении обработки данных и методиках интерпретации результатов измерений.

Задачей акустического сканирования обсаженных скважин является уточнение результатов стандартной акустической цементометрии, а именно: выявление типа дефектов цементного камня, которые могут нарушать герметичность обсадки (продольных каналов и кольцевых зазоров). В высокоскоростных разрезах, когда скорости продольной волны по породе и по обсадной колонне имеют близкие значения, метод акустического сканирования становится единственным при оценке качества цементирования.

Ниже рассматриваются основные требования к измерительному зонду акустического сканера, особенности алгоритмов обработки данных. Приводится пример практической реализации технологии оценки качества цементирования.

Измерительный зонд сканера

Акустическое сканирование основано на измерении параметров сигналов радиального резонанса облучаемого сегмента обсадной трубы, возникающего при нормальном падении акустического импульса на внутреннюю стенку трубы (сигнал реверберации). Чтобы эти колебания возникли, нужно зарегистрировать и измерить их параметры, при этом необходимо выполнение двух условий:

1. Длительность падающего на стенку акустического импульса должна быть достаточно малой (около двух периодов) и амплитуда собственных колебаний электроакустического преобразователя гораздо меньше амплитуды сигнала реверберации, чтобы имелась возможность приема сигнала реверберации вне импульса первого отражения.
2. Частотный спектр падающего импульса должен содержать гармоники, соответствующие резонансной частоте стенки трубы.

Как известно [7], частота радиального резонанса стенки обсадной колонны f_k определяется формулой:

$$f_k = C/2h,$$

где C – скорость продольных колебаний в стали; h – толщина стенки трубы.

Обычно толщина стенки находится в пределах 5–12 мм и, соответственно, значение $f_k = 250\text{--}600$ кГц. Таким образом, в акустических сканерах используются акустические колебания с частотой ниже, чем в акустических телевизорах (0,5–2,0 МГц).

Принципиальной частью аппаратуры ультразвуковых методов является электроакустический преобразователь, который встроен во вращающуюся головку и работает по принципу эхолокации. Преобразователь выполняет функции излучателя и приемника акустических колебаний. К преобразователю акустического телевизора предъявляются два основных требования:

- узкая диаграмма направленности, обеспечивающая высокое геометрическое разрешение изображения стенки скважины;
- высокое подавление боковых и обратного (направленного внутрь зонда) лепестков диаграммы излучения.

К преобразователю сканера добавляются еще два требования:

- Для проведения измерения одним преобразователем в обсадных колоннах с различными толщинами стенок необходимо возбуждать акустический импульс, имеющий ширину частотного спектра, близкую к диапазону f_k . Такой ширины частотного спектра излучения можно достигнуть в акустическом импульсе с ведущей частотой $f_0 \approx 400$ кГц и длительностью 1,5–2,0 периода.
- Поскольку коэффициент отражения на границе скважинной жидкости и обсадной трубы не превышает значения 0,9, то амплитуда сигнала реверберации $A_r \leq 0,1A_0$, где A_0 – амплитуда первого отражения. Это означает, что амплитуда шума должна быть в десятки раз меньше A_0 .

Известно [5], что сформировать короткий акустический импульс с высоким подавлением собственных шумов, используя пьезопластину из стандартной цирконат-титанат-свинцовой (ЦТС) керамики, невозможно. Для преобразователей сканеров применяются специальные виды керамики, например, метаниобат-свинцовый [9]. На рис. 1 приведены волновые картины акустических импульсов, излучаемых преобразователями, активные элементы которых выполнены из пьезопластин ЦТС (а) и композитной керамики (б).

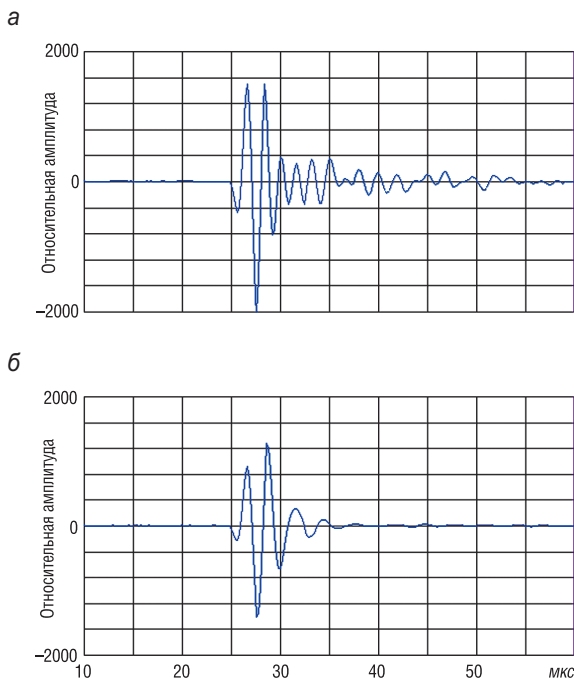


Рис. 1. Волновые картины электроакустических преобразователей, отличающихся только материалом активного элемента:

а – ЦТС-керамика; б – композитная керамика. Излучающий и принимающий преобразователи размещены напротив друг друга на расстоянии 40 мм в воде

Хотя основной излучаемый импульс в обеих волновых картинах имеет подобную форму, собственные колебания преобразователей существенно различаются. Преобразователь ЦТС (рис. 1, а) имеет длительное продолжение колебаний, которые затрудняют прием сигнала реверберации. В волновой картине композитного преобразователя (рис. 1, б) собственные колебания отсутствуют. Частотный спектр излучения композитного преобразователя находится на уровне 0,5–300–600 кГц. Таким образом, преобразователь из ЦТС-керамики имеет слишком большую длительность собственных колебаний для того, чтобы он мог быть использован в сканере, работающем по принципу эхолокации, то есть когда преобразователь является и излучателем,

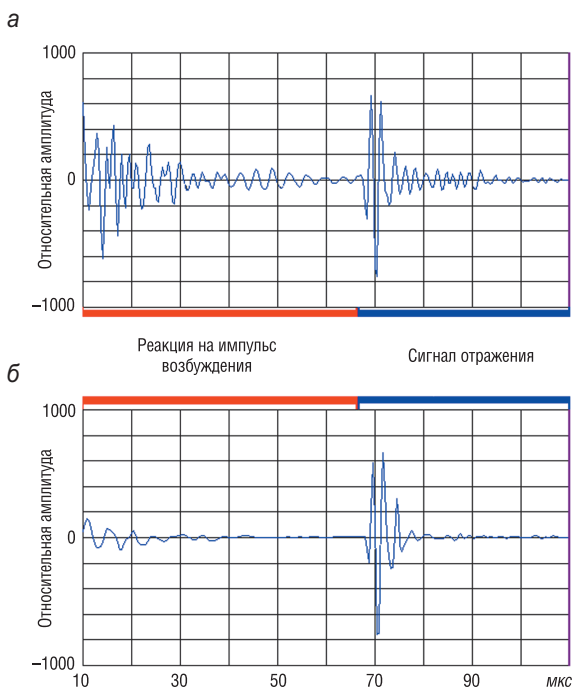


Рис. 2. Волновые картины эхо-сигналов электроакустических преобразователей:

а – ЦТС-керамика; б – композитная керамика. Преобразователи установлены на расстоянии 50 мм от стального бруска в воде. Толщина бруска – 20 мм. Собственные шумы преобразователя из ЦТС-керамики по амплитуде и длительности многократно превосходят шумы преобразователя из композитной керамики

и приемником акустических колебаний. Этот недостаток ЦТС-керамики очевиден в сигнале отражения, показанном на рис. 2.

В волновой картине преобразователя из ЦТС-керамики (рис. 2, а) очевидны два недостатка, которые мешают акустическому сканированию:

1. Реакция на электрический импульс возбуждения имеет слишком большую длительность. Практически она прекращается только через 70 мкс после приложения электрического импульса к пьезоэлементу. При такой длительности реакции преобразователь должен находиться на расстоянии не менее 50 мм от стенки обсадной трубы.

2. Большая длительность реакции на электрический импульс сказывается и на форме сигнала отражения. После основного импульса отражения (первые два периода) в течение 20 мкс происходят колебания самого преобразователя, амплитуды которых только в 6 раз меньше, чем у основного импульса.

Указанные недостатки в гораздо меньшей степени проявляются у композитного преобразователя (рис. 2, б). Длительность реакции на электрический импульс позволяет приближать этот преобразователь к отражающей поверхности на расстояние 20 мм. Низкие значения амплитуд собственных шумов благоприятны для регистрации сигналов радиальной реверберации обсадной колонны.

Эффект влияния акустических свойств материала, прилегающего к внешней поверхности обсадной трубы

Влияние цемента на сигналы акустического сканера можно оценить экспериментально в макете обсаженной скважины, изображенном на рис. 3.

Зонд сканера помещен в центре отрезка стальной обсадной трубы 146 мм длиной 0,5 м, зацементированного портландцементом марки 500. Толщина стенки трубы варьирует вдоль продольной оси и имеет значения 9, 8 и 7 мм. В цементном кольце имеются два сектора толщиной 7 мм, прилегающих к стальной трубе и заполненных, как и внутреннее пространство трубы, маслом ИМП-10. Зонд в нижней

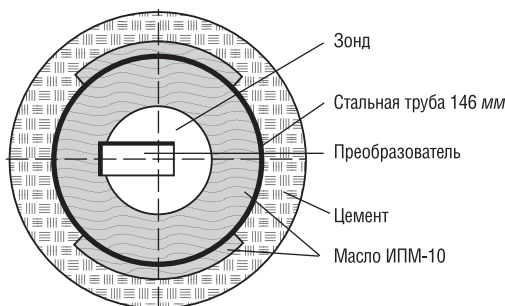


Рис. 3. Разрез модели скважины для изучения влияния типа тампонажного вещества на сигналы акустического сканера

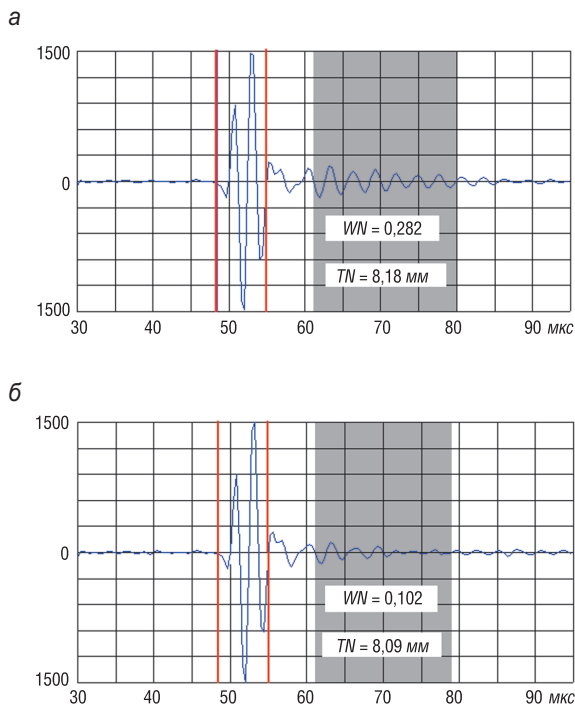


Рис. 4. Сигнал сканера, отраженный от внутренней стенки стальной трубы с внешним диаметром 146 мм и толщиной стенки 8 мм:

а – на внешней стенке трубы масло ИПМ-10; б – труба зацементирована. Первое отражение выделено красными вертикальными линиями, сигнал реверберации затемнен. Показатель затухания сигнала реверберации – WN , TN – определенное значение толщины стенки трубы. В зацементированном секторе трубы сигнал реверберации затухает в несколько раз быстрее, чем в “свободной” трубе

части стенда опирается на подшипник, жестко закрепленный на дне стенда и позволяющий зонду свободно поворачиваться вокруг продольной оси стенда. Волновые картины, изображенные на рис. 4, представляют эхо-сигналы сканера в секторах обсадной трубы на участке с толщиной стенки 8 мм.

Первый волновой пакет (выделен вертикальными красными линиями) представляет отражение от внутренней поверхности трубы,

сигнал реверберации находится в затемненных участках волновых картин. При контакте цемента и обсадной трубы (рис. 4, б) реверберация минимальна, то есть колебания имеют малую амплитуду и высокий декремент затухания. В “свободной” трубе (рис. 4, а) наблюдается обратная картина, амплитуда и длительность реверберации максимальны. Измерения в моделях обсадки показывают, что амплитуда сигнала реверберации зависит от толщины стенки трубы и марки цемента. Отношение показателей затухания сигнала реверберации WN в свободной и зацементированной трубе может изменяться от 2 до 4 в зависимости от соотношения толщины трубы и марки цемента. Таким образом, при оценке характера контакта обсадной колонны с цементным камнем необходимо учитывать толщину стенки колонны и производить нормализацию индекса цементирования. Следовательно, измерение толщины стенки трубы является неотъемлемой частью процедуры оценки ее сцепления с цементным камнем.

Обработка данных и измеряемые параметры

Основным параметром, используемым для определения плотности контакта обсадной колонны и цемента, является относительное изменение амплитуды сигналов реверберации. В связи с тем, что необходимо знать толщину стенки трубы и для обеспечения устойчивости измерений, обычно производится трансформирование сигнала в частотную область [9]. Частотные характеристики сигнала реверберации служат входными параметрами для расчета толщины стенки, а амплитудные характеристики нормируются по амплитудам первых отражений. Нормированные значения амплитуд корректируются за толщину стенки колонны и дополнительно нормируются по их значениям в свободной колонне и при плотном контакте колонны и цемента. Полностью нормированные параметры имеют значения от 0 до 1 и сопоставимы с индексом цементирования стандартного цементомера, только имеют противоположное направление изменения: минимальные значения соответствуют хорошему цементированию, максимальные – свободной колонне. С учетом известных значений импедансов промысловой жидкости и стальной трубы легко также вычислить импеданс цемента. Хотя такие расчеты часто весьма неточны, они используются для оценки типа цемента и наличия газа в порах цемента [6].

Результаты сканирования нефтяной скважины

Результаты получены путем обработки данных, содержащихся в волновых картинах отражений, вызванных импульсными посылками электроакустического преобразователя, непрерывно вращающегося вокруг оси скважинного прибора. Преобразователь выполнен из композитной пьезокерамики, с основной частотой излучения около 400 кГц. Каждый цикл излучение-прием отстоит от соседних циклов на 12° , то есть $1/30$ оборота. Циклы синхронизированы по углу поворота преобразователя, а их положение в пространстве учитывалось по показаниям акселерометров. Начало каждого оборота преобразователя фиксировано относительно образующей прибора. Каждая принятая волновая картина, синхронизированная с моментом излучения, оцифрована в приборе 14-разрядным преобразователем (АЦП). Волновые картины оцифрованы 256 точками с шагом 0,4 мкс. Измерение скорости упругих колебаний в промывочной жидкости произведено дополнительным преобразователем, установленным на фиксированном расстоянии от отражателя.

Поскольку диаметр излучающей поверхности преобразователя в несколько раз превосходит длину волны излучаемого акустического импульса в жидкости, то телесный угол раскрытия диаграммы направленности излучателя не превосходит 30° , что обеспечивает пятно “засветки” стенки скважины на уровне 0,5 от интенсивности в центре луча, примерно, 30 мм, на удалении 50 мм. Таким образом, вращением преобразователя, периодически излучающего упругие колебания узким пучком, обеспечивается дискретно-непрерывное обследование стенки скважины. Результаты измерений показаны на рис. 5.

В первой колонке показано сопоставление среднего значения индекса цементирования, измеренного сканером, с индексом, определенным по данным стандартного цементомера УЗБА. Вторая колонка представляет распределение индекса цементирования по развертке обсадной трубы. Параметр представлен в форме цветовой гаммы, коричневая засветка соответствует плотному контакту колонны и цемента, голубая – свободной колонне.

Сопоставление среднего значения индекса цементирования сканера и стандартного цементомера позволяет заключить, что средняя оценка состояния контакта цемента с колонной по данным сканера соответствует оценке, полученной стандартным цементомером. Следовательно, можно утверждать, что и распределение индекса цемен-

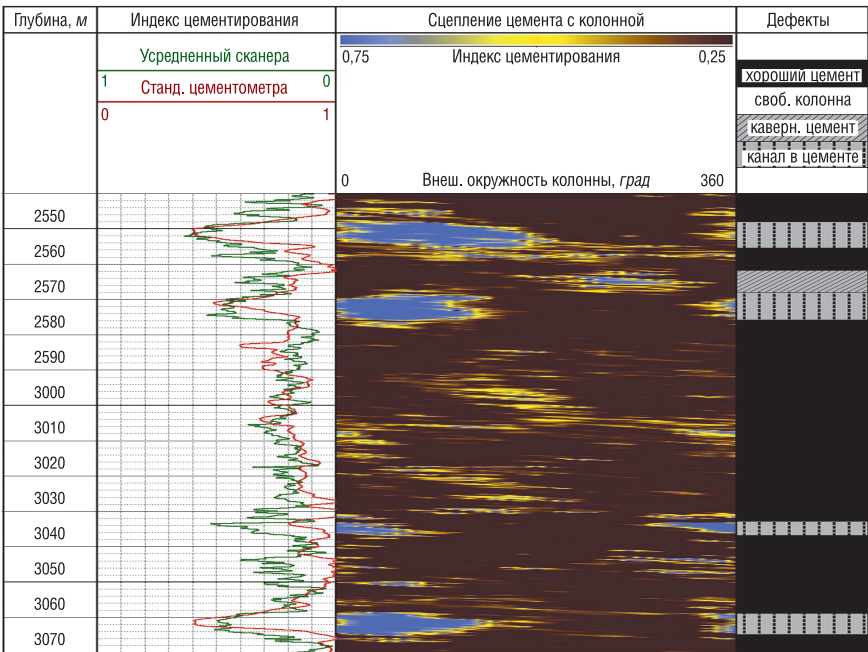


Рис. 5. Определение типов дефектов цементного камня в нефтяной скважине
Представленные в колонках параметры указаны в заголовке диаграммы. Голубые пятна в колонке 2 обозначают продольные каналы и каверны в цементе

тирования по стенке обсадной колонны, по которому получена средняя оценка, также достоверно и его распределение в колонке 2 изображает распределение цемента вокруг обсадной колонны. В этом случае отсутствие контакта цемента с колонной (голубые пятна) можно интерпретировать как дефекты цементного камня, что и показано в третьей колонке. В представленном примере дефекты цементного камня не имеют сплошного простираия, представлены отдельными кавернами и каналами протяженностью около 5 м.

Заключение

Акустическое сканирование обсаженных скважин является эффективным методом оценки качества цементирования обсадных колонн.

Недостаточное внимание к этому важному и полезному способу контроля технического состояния нефтяных скважин в России можно объяснить только отсутствием отечественных разработок технических средств его реализации. Современное состояние дел с пьезоэлектрическими материалами и цифровыми электронными устройствами, а также развитая теория метода позволяют легко реализовать акустический сканер. Разработанная авторами технология включает скважинный прибор, программные средства обработки данных и формализованной оценки типов дефектов цементного камня. Технология опробована на нефтяных скважинах и подтвердила большие возможности акустического сканирования как метода, дополняющего и уточняющего результаты стандартной акустической цементометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Новохатский М. И.* Опыт применения высокочастотного акустического дефектомера в условиях подземных хранилищ газа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2007. Вып. 162. № 9. С. 117–121.
2. *Терехов О. В.* Применение метода отраженных волн при оценке технического состояния скважин // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2007. Вып. 161. № 8. С. 56–59.
3. *Терехов О. В., Стрелков В. И.* Физическое моделирование по определению области применения акустического телевизора // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 172. № 7. С. 65–70.
4. *Broding R. A.* Application of the Sonic Volumetric Scan Log to Cement Evaluation // SPWLA 25th Annual Logging Symposium Transactions (1984). Paper JJ.
5. *Cathignat D., Sapozhnikov and Theillere Y.* Comparison of Acoustic Fields Radiated from Piezoceramic and Piezocomposite Focused Radiators // JASA 105 (5). May 1999. P. 2612–2617.
6. *Catala G., Stowe I. and Henry D.* Method for Evaluation the Quality of Cement Surrounding the Casing of a Borehole. 1987, US patent # 4 703 427.
7. *Havira R. M.* Ultrasonic Cement Bond Evaluation // SPWLA 23^d Annual Logging Symposium Transactions (1982). Paper N.
8. *Strozetski B. B., Hilliker D. J. and Oliver D. W.* Theoretical and Experimental Development of the Ultrasonic Diplog System // SPWLA 30th Annual Logging Symposium Transactions (1989). Paper I.
9. *Tello L. N., Molder S. D. and Holland R. M.* The Fourier Transform Applied to Cased-hole Ultrasonic Scanner Measurements // SPWLA 49th Annual Logging Symposium Transactions (2008). Paper OO.