

УДК 550.832.46

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

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБСАДКИ СКВАЖИНЫ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ**

Приведены основные особенности технологии акустического сканирования обсаженных нефтяных скважин, реализованной в аппаратуре АСТ (акустический сканер-телевизор). Рассмотрены существенные отличия данной технологии от российских аналогов. Аппаратура и технологии позволяют получить количественные характеристики состояния колонны и цементного камня. Приведены примеры решения задач по оценке технического состояния обсадки, обусловленные преимуществами предложенной технологии: применением низкодобротных электроакустических преобразователей и цифровой регистрацией волновых картин отраженных волн.

*Ключевые слова:* скважина, акустическое сканирование, обсадные колонны, перфорация, дефектоскопия.

### **Введение**

Оценка технического состояния обсадки нефтяной скважины является одной из главных задач нефтепромысловый геофизики. Когда скважина эксплуатируется десятки лет, ее обсадная колонна изнашивается, появляются трещины, коррозия и прочие дефекты. Цементный камень теряет контакт с обсадной колонной. Результатом несвоевременных ремонтных работ могут быть утечки нефти и газа и другие неприятности. При вводе скважины в эксплуатацию необходимо контролировать качество перфорации и цементирования обсадной колонны.

Оценка технического состояния обсадки скважины имеет два аспекта:

- 1) определение состояния обсадной колонны, то есть измерение толщины и внутреннего радиуса стальных труб в нескольких точках по окружности трубы и соответственно нахождение дефектов;
- 2) определение наличия контакта обсадной трубы с цементным камнем и горной породой, выявление дефектов в цементном камне,

таких как продольные каналы, по которым может происходить движение флюидов.

Существуют различные методы скважинной дефектоскопии: электромагнитные, радиоактивные, акустические и др. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Так, электромагнитный метод не пригоден для оценки качества контакта цемента с породой [5]. Радиоактивный метод (толщиномер–дефектомер) имеет слабую разрешающую способность. Оба метода неспособны определить внутренний профиль колонны, поэтому они дополняются измерениями механических профилемеров.

Наиболее универсальным является метод акустического сканирования, позволяющий в общем случае решить обе задачи с высоким пространственным разрешением, хотя и он имеет свои ограничения, связанные с состоянием промывочной жидкости. Однако ограничения акустического метода носят технический характер. Они не связаны с принципами измерений, поэтому преодолимы.

Ниже приводится один из вариантов реализации акустического метода, который явился важным дополнением стандартной акустической цементометрии. Технология, включающая скважинный прибор (сканер-телевизор), программные средства регистрации и обработки данных, прошла широкое промышленное опробование в нескольких регионах России. Проведенный за несколько лет анализ материалов показал достоинства данной технологии и позволил выявить недостатки, над устранением которых работает авторский коллектив.

### **Основные особенности технологии оценки качества цементирования, ее существенные отличия от существующих аналогов**

В отношении принципов построения акустического телевизора рассматривались результаты отечественных и зарубежных разработчиков аналогичной аппаратуры [4, 6–8, 15, 16]. При разработке технологии, ввиду отсутствия отечественных разработок, главным источником информации явился мировой опыт [9–14]. В частности, принимая во внимание необходимость измерения сигналов реверберации для измерения толщины стенки обсадной трубы и оценки плотности ее контакта с цементным камнем, был разработан низкодобротный электроакустический преобразователь [2], возбуждающий акустический импульс длительностью 2 периода излучаемой волны.

Предполагалось, что качество измерений не всегда будет хорошим, так как маловероятно обеспечить идеальную центровку прибора в реальных скважинах и иметь однородную, акустически прозрачную промывочную жидкость. Поэтому необходимо производить оцифровку и передачу полных волновых картин на поверхность, чтобы была возможность использовать различные алгоритмы обработки данных. Передача на поверхность оцифрованных волновых картин предполагает передачу по кабелю большого количества информации. Чтобы обеспечить измерения толщины стенки обсадной трубы и визуализацию ее внутренней поверхности, сканирование необходимо производить на разных частотах. Сканирование с целью оценки качества цементирования проводится на относительно низкой частоте (НЧ) 250–600 кГц, а для получения изображения высокого разрешения (акустическое телевидение) используются мегагерцевые частоты. Последнее требование обусловило применение в одной сканирующей головке двух датчиков с собственными частотами 400 кГц (НЧ) и 1,0 МГц (ВЧ). Система с двумя преобразователями позволяет получить данные для оценки крепления колонны и состояния ее внутренней поверхности, не извлекая прибор из скважины. Циклы опроса каждого преобразователя синхронизированы по углу поворота головки, их положение в пространстве учитывается по показаниям системы ориентации (трехосные акселерометры). Начало каждого оборота фиксировано относительно образующей прибора. Измерение скорости упругих колебаний в промывочной жидкости осуществляется дополнительным преобразователем, установленным на фиксированном расстоянии от отражателя. Все принимаемые волновые пакеты синхронизированы с моментом излучения соответствующего преобразователя. Измерения производятся путем обработки данных, содержащихся в волновых картинах отражений, вызванных импульсными посылками электроакустического преобразователя, непрерывно вращающегося вокруг оси прибора [1].

К особенностям технологии относятся: 1) наличие сканера, способного определять толщину стенки колонны и наличие контакта колонны и цемента; 2) низкодобротные преобразователи, обеспечивающие получение волновых картин с высоким временным и частотным разрешением; 3) регистрация полных волновых картин отраженных волн в аппаратуре АСТ [3]. Эти особенности технологии существенно отличают ее от отечественных аналогов [4, 8], в

которых акустический метод отраженных волн используется только для получения телевизионных изображений внутренней поверхности стенки скважины. Вероятно, с целью уменьшения объема данных от скважинных приборов на поверхность передаются только измеренные значения амплитуд и времен. Таким образом, повторная обработка полученных данных может состоять лишь в изменении формы их графического представления.

### ***Разрешающая способность и объем передаваемых данных***

Основной областью применения сканера-телевизора является исследование нефтяных скважин, обсаженных колоннами диаметром до 168 мм с толщиной стенки до 10 мм. Исходя из поставленной задачи, выбраны технические характеристики, определяющие разрешающую способность метода.

Угол раскрытия диаграммы направленности НЧ-излучателя не превышает 30°, что обеспечивает пятно “засветки” стенки скважины на уровне 0,5 от интенсивности в центре луча, примерно 30 мм, на удалении 50 мм. Угол раскрытия диаграммы направленности ВЧ-излучателя не превышает 15°, что обеспечивает пятно “засветки” стенки скважины на уровне 0,5 от интенсивности в центре луча, примерно 30 мм, на удалении 70 мм. Для проведения измерений с высоким разрешением необходимо обеспечить перекрытие соседних измерений по площади не менее чем на 50%. Это означает, что за один оборот сканирующей головки прибора в колонне 168 мм необходимо произвести не менее 30 циклов измерения для НЧ-преобразователя и не менее 64 циклов для ВЧ-преобразователя. Если для НЧ-измерений достаточно иметь минимально допустимое количество циклов, так как их основное назначение – оценка качества цементирования, то при ВЧ-измерениях для повышения разрешающей способности количество циклов следует удвоить. Чтобы обеспечить точные измерения параметров волновых пакетов, каждая волновая картина НЧ-преобразователя оцифрована с шагом 0,4 мкс 256 точками. Для ВЧ-преобразователя шаг оцифровки выбран 0,1 мкс, длительность оцифровки – 4096 точек. Таким образом, объем данных для одного полного оборота сканирующей головки составляет 16 кбайт (31 волновая картина плюс технические данные) для НЧ-преобразователя и 512 кбайт для ВЧ-преобразователя (128 волновых картин). Объем данных ВЧ-преобразователя чрезмерен для передачи по кабелю, поэтому они

упакованы (оставлены только экстремумы), что позволяет сократить объем до 8 *кбайт* на 128 волновых картин. Для надежной передачи данных по кабелю длиной до 7000 м использована телеметрия со скоростью передачи 100 *кбит/с*. Скорость передачи невысокая, зато обеспечивается надежная передача данных при приемлемой скорости каротажа: 350 м/ч при шаге по глубине 0,2 м (НЧ-преобразователь) и 150 м/ч при шаге 0,05 м (ВЧ-преобразователь).

### Оценка технического состояния обсадки

Не останавливаясь на стандартных решениях, рассмотрим только те, которые могут быть получены за счет преимуществ данной технологии. К ним относятся:

- установление глубины прорезки колонны при щелевой перфорации;
- определение наличия сквозных отверстий в колонне при кумулятивной перфорации;
- определение формы деформации колонны;
- определение качества контакта колонны с цементным камнем.

Применение низкодобротных электроакустических преобразователей и наличие исходных данных в форме волновых картин позволяют проводить количественные оценки размеров дефектов обсадных колонн. Так, для ВЧ-преобразователя с основной частотой излучения 1 МГц наличие в стенке трубы углубления в 3 мм диаметром 10 мм приводит к появлению в волновой картине двух разделенных по времени пакетов отраженных волн. Первое – от стенки трубы, второе – от дна углубления. На рис. 1 показаны волновые картины отражений в цельной трубе (а) и в трубе, перфорированной фрезой 10 мм (б).

Поскольку пакеты отражений на рис. 1, б четко разделены, разница времен их прихода легко измеряется и соответственно вычисляется глубина прорезки. На основании размеров углубления можно судить о наличии интервалов полной прорезки трубы. На рис. 2 представлен пример щелевой перфорации колонны 168 мм тремя фрезами. В первой колонке показан средний внутренний диаметр трубы. В третьей колонке – развертка значений амплитуд первых отражений, в четвертой и пятой – развертки измеренных радиусов по первому отражению и с учетом второго отражения соответственно. Положения щелей видны по характерным белым полосам на развертках и условно они обозначены цифрами от 1 до 3. Следует обратить внимание на то, что на развертке радиусов, построенной с учетом вторых отражений

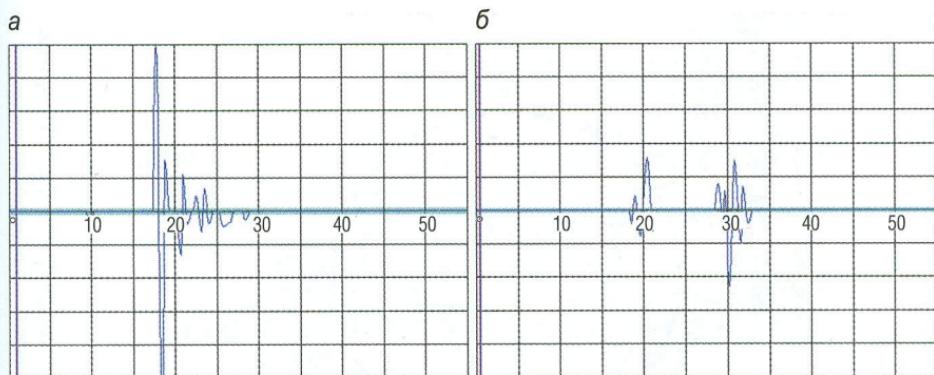


Рис. 1. Волновые картины отражений в цельной трубе (а) и в трубе, перфорированной фрезой (б). Излучатель ВЧ 1,0 МГц. В месте перфорации наблюдаются два отражения: первое – от края, второе – от дна перфорационной канавки

(колонка 5), наличие перфорационных борозд выражено гораздо ярче, чем на развертке 4, построенной по первым отражениям. Справа красным цветом показано поперечное сечение внутренней поверхности трубы, построенное по радиусам из колонки 5. Граница внешней поверхности трубы по номинальному значению 168 мм обозначена кругом синего цвета. Место сечения показано курсором в колонках разверток. Как следует из разверток и формы сечения, не все щели имеют одинаковую глубину. Форма поперечного сечения показывает, что края щелей, особенно первой, выгнуты внутрь скважины на 2–5 мм. Наличие относительно сильного второго отражения (от дна щели) можно объяснить тем, что по крайней мере недорезанный при фрезеровке остаток стальной стенки был выдавлен.

Выделенные белыми овалами интервалы соответствуют углублениям, превышающим 10 мм, то есть гарантированно выходящим за внешнюю поверхность трубы. В случае использования только амплитудных параметров первого отражения можно сделать заключение о наличии перфорации по трем щелям на всем интервале, что, как следует из приведенного примера, не совсем правильно и вступает в противоречие со значениями радиусов, определенных по первым отражениям (колонка 4). Для наглядности на рис. 3 показано аксонометрическое изображение внутренней поверхности трубы из рис. 2 в интервале глубин xx29–xx35 м. Из рис. 3 следует, что по большей части траектории третьей фрезы щель не прорезана.

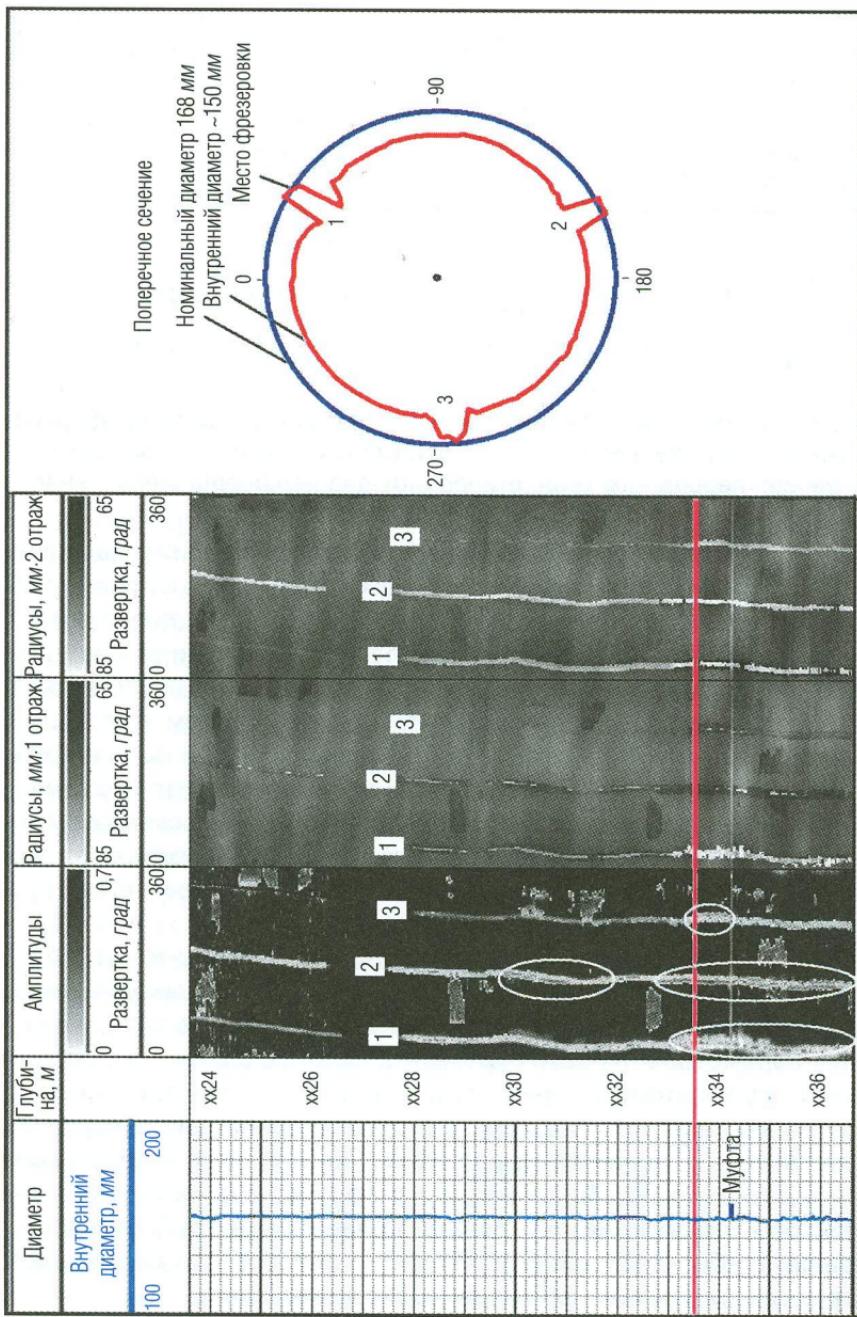


Рис. 2. Оценка качества щелевой перфорации. Глубина щели, превышающая толщину стенки трубы, показана в выделенных овалом интервалах колонки 2

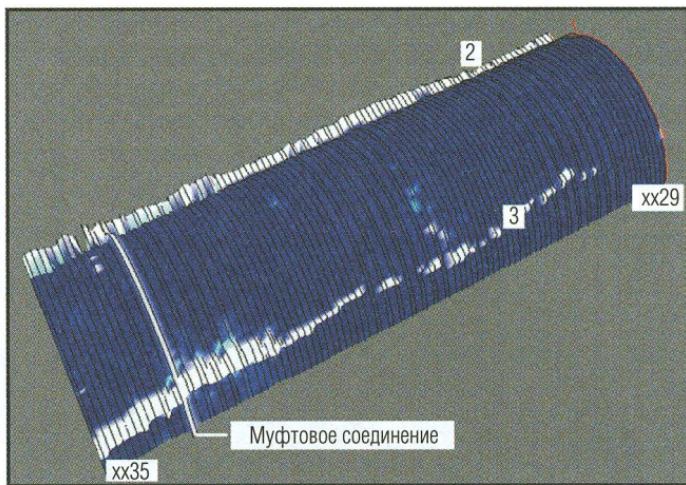


Рис. 3. Аксонометрическое изображение внутренней поверхности трубы из рис. 2

При кумулятивной перфорации количество отверстий в трубе может не совпадать с количеством использованных зарядов. Акустический телевизор устанавливает факт проведенной перфорации по наличию дефектов на внутренней поверхности трубы. Обычно это изображается развертками, модулированными значениями амплитуд и радиусов первых отражений. Однако установить отличие сквозных прострелов колонны от вмятин далеко не всегда удается. Имея волновые картины ВЧ- и НЧ-преобразователей, можно определить место перфорации по изгибу трубы (синфазное увеличение внутреннего и наружного диаметров и небольшое уменьшение толщины стенки). Как правило, в интервале перфорации появляются каналы в цементном кольце. В некоторых волновых картинах, соответствующих положению преобразователя против перфорационного отверстия, особенно ВЧ-преобразователя, полностью пропадают пакеты отражений. На рис. 4 показан пример оценки состояния обсадки в интервале перфорации. В первой колонке показаны кривые средних значений внутреннего и внешнего диаметра, а также толщины стенки обсадной трубы. Внешний диаметр в интервале перфорации увеличен по отношению к номинальному значению на 5–7,5 мм. Примерно так же увеличился и внутренний диаметр. В колонках 3 и 4 показаны развертки амплитуд и радиусов,

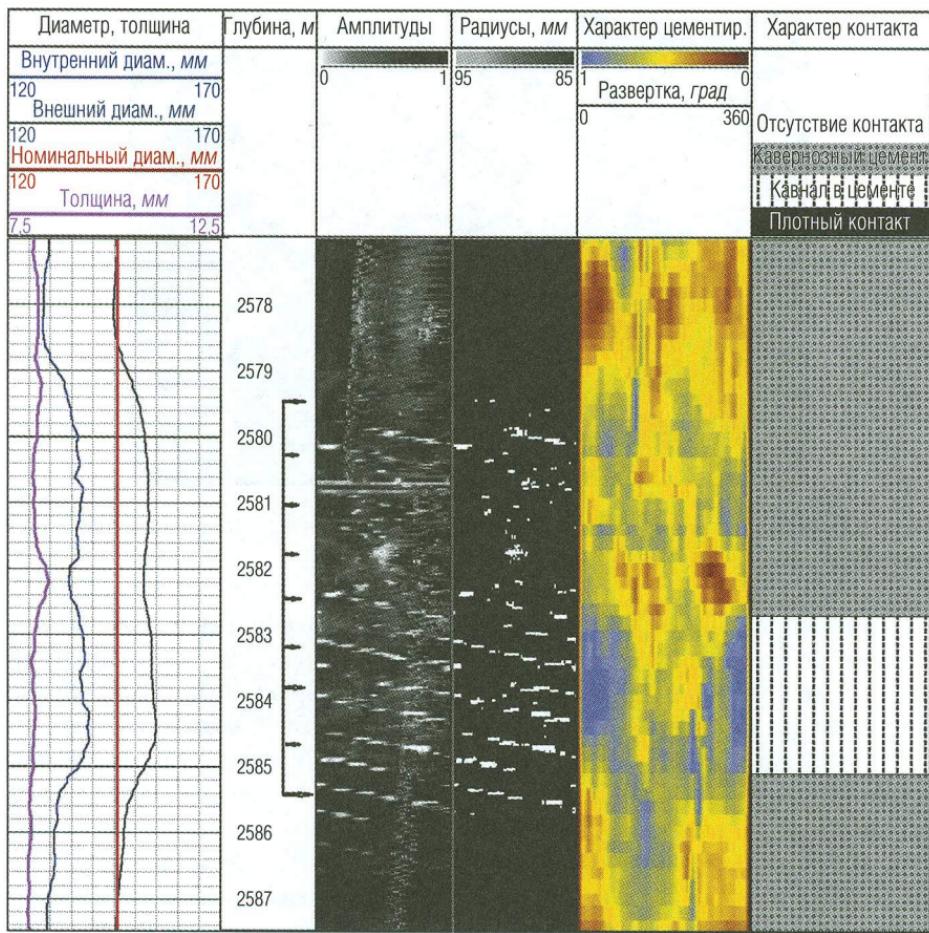


Рис. 4. Результаты акустического сканирования интервала кумулятивной перфорации колонны 146 мм: наблюдается увеличение среднего диаметра обсадной колонны, наличие дефектов на внутренней поверхности колонны, канал в цементном камне

измеренных по волновым картинам ВЧ-преобразователя. В колонке 5, в цветовой гамме, соответствующей значениям индекса цементирования, приведено распределение контакта колонны и цемента вокруг трубы, определенное по волновым картинам НЧ-преобразователя. В колонке 6 в обобщенном виде дан тип дефектов цементного камня

(колонка цементирования). Из колонок 5 и 6 следует, что в интервале перфорации имеется канал в цементном камне. Канал, возможно, образовался в результате перфорации.

На рис. 5 приведен продольный разрез колонны в интервале перфорации, построенный по значениям внутренних и наружных радиусов в аксонометрической проекции.

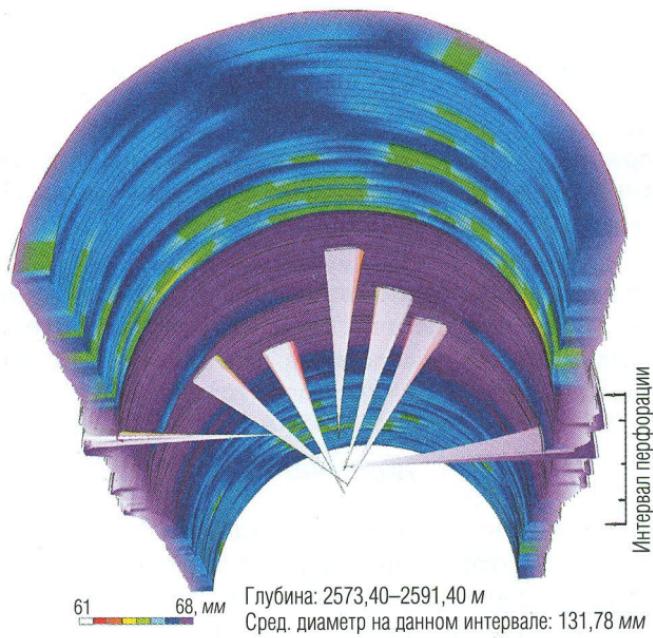


Рис. 5. Продольный разрез обсадной колонны в интервале перфорации. Увеличены внутренние и внешние радиусы. Имеются сквозные отверстия

Основаниями конусов, вершины которых сходятся в центр трубы, показаны положения сквозных отверстий. Эти отверстия соответствуют направлениям, по которым отражения отсутствуют или приходят позже расчетного значения времени. Как следует из рис. 5, далеко не все дефекты, отмечаемые в колонках 3 и 4 (рис. 4), соответствуют перфорационным отверстиям. Это утверждение поясняется поперечным сечением обсадной трубы (рис. 6).

Перфорационное отверстие выглядит слишком большим, так как ближайшие отражения получены в точках, отстоящих на  $12^\circ$  от точки,



Рис. 6. Поперечное сечение обсадной колонны в интервале кумулятивной перфорации на глубине 2582,4 м. Построено по данным сканера (30 волновых картин на один оборот головки)

в которой не зарегистрировано отражение. Несмотря на нереальные размеры отверстия, его наличие однозначно фиксируется, так же как и отсутствие других отверстий в данном сечении, хотя изгибы стенки трубы имеются.

### **Заключение**

Рассмотренные примеры решения задач по оценке технического состояния обсадки скважин показывают возможности метода акустического сканирования в технологии АСТ. Преимущества данной технологии, связанные с применением низкодобротных электроакустических преобразователей и регистрацией волновых картин отраженных волн, позволяют не только установить факт наличия дефектов обсадной колонны, но и дать количественные оценки размеров этих дефектов. В частности, при благоприятных условиях (акустически прозрачная промывочная жидкость и толщина стенки колонны, не превышающая 10 мм) могут быть получены с достаточной точностью значения внутренних и наружных радиусов обсадной колонны, а также плотности контакта колонны с цементным камнем. Эти характеристики имеют первостепенное значение при оценке эффективности перфорационных работ.

Рассмотренная технология, как и любая другая, наряду с достоинствами имеет ограничения. Эти ограничения главным образом связаны

с частотным спектром излучения. Работа в скважинах, обсаженных колоннами с толщиной стенки более 10 мм, показала необходимость понижения частоты преобразователя для сканера. Задача снижения ведущей частоты преобразователя требует разработки скважинного прибора со сменными сканирующими головками. Такая разработка уже ведется.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс программ первичной обработки данных каротажа LogPWin // Реестр программ для ЭВМ. № 2005612569.
2. Смирнов Н. А., Варыхалов А. С., Рыбаков В. В., Пивоварова Н. Е. Технико-технологические особенности оценки качества цементирования обсадных колонн методом акустического сканирования // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 4 (181). С. 98–108.
3. 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”, 2010.
4. Тамбулатов В. Д., Еникеев В. Н., Гайфуллин М. Я. и др. Возможности аппаратно-программного комплекса видеокаротажа малого диаметра АВК-42М // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2006. Вып. 7–8 (148–149). С. 242–254.
5. Теплухин В. К. и др. Совершенствование аппаратуры и технологии скважинной электромагнитной дефектоскопии // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2006. Вып. 7–8 (148–149). С. 173–183.
6. Терехов О. В. Применение метода отраженных волн при оценке технического состояния скважин // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2007. Вып. 8 (161). С. 56–59.
7. Терехов О. В., Стрелков В. И. Физическое моделирование по определению области применения акустического телевизора // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 7 (172). С. 65–70.
8. Терехов О. В. Совершенствование аппаратуры акустического телевизора и разработка методики исследования технического состояния скважины: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Уфа, 2007.
9. Broding R. A. Application of the Sonic Volumetric Scan Log to Cement Evaluation // SPWLA 25<sup>th</sup> Annual Logging Symposium Transactions. 1984. Paper JJ.
10. Catala G., Stowe I., Henry D. Method for Evaluation the Quality of Cement Surrounding the Casing of a Borehole. 1987. US patent № 4703427.
11. Cathignal D., Sapozhnicov, Theillere Y. Comparison of Acoustic Fields Radiated from Piezoceramic and Piezocomposite Focused Radiators // JASA 105 (5). May 1999. P. 2612–2617.

12. *Havira R. M.* Ultrasonic Cement Bond Evaluation. // SPWLA 23<sup>d</sup> Annual Logging Symposium Transactions. 1982. Paper N.
13. *Strozetski B. B., Hilliker D. J., Oliver D. W.* Theoretical and Experimental Development of the Ultrasonic Diplog System // SPWLA 30<sup>th</sup> Annual Logging Symposium Transactions. 1989. Paper I.
14. *Tello L. N., Molder S. D., Holland R. M.* The Fourier Transform Applied to Cased-hole Ultrasonic Scanner Measurements // SPWLA 49<sup>th</sup> Annual Logging Symposium Transactions. 2008. Paper OO.
15. *Faraguna J. K., Chace D. M., Schmidt M. G.* An Improved Borehole TelevIEWer System: Image Acquisition, Analysis and Integration // SPWLA 30<sup>th</sup> Annual Logging Symposium Transactions. 1989. Paper UU.
16. *Zemanek J., Gleen E. E., Norton L. J. et al.* Formation Evaluation by Inspection with the Borehole TelevIEWer // Geophysics. 1970. V. 35. P. 254–269.

*По материалам конференции “Современные проблемы промысловой геофизики. Производственная деятельность ООО “Нефтегазгеофизика” за последние 10 лет”*