

УДК 550.832.44 (47+57)

СЕКТОРНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ – ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ

С.В. Белов, С.Л. Гладкий, И.В. Ташкинов, А.В. Шумилов

Аннотация. Рассмотрены вопросы эффективности акустического каротажа. Изложены особенности отечественных и зарубежных видов аппаратуры акустического каротажа. Перечислены факторы, влияющие на качество и достоверность оценки технического состояния скважины, учёт которых позволяет получить полноценную информацию. Показано, что применение секторных приборов позволяет повысить чувствительность акустического метода на головных волнах к дефектам цементирования малых размеров. Описаны случаи, в которых секторный акустический каротаж в открытом стволе имеет значительные преимущества перед стандартным интегральным методом.

Ключевые слова. Геофизические исследования скважин, интерпретация данных ГИС, акустический каротаж, качество цементирования колонн обсадных труб, оценка технического состояния скважины, секторные и интегральные акустические приборы.

Abstract. Questions of efficiency acoustic logging are considered. Features of domestic and foreign types of the equipment acoustic logging are stated. The factors influencing quality and reliability of an assessment of a technical condition of a well which account allows receiving full information are listed. It is shown that use of sector devices allows increasing sensitivity of an acoustic method on head waves to defects of cementation of the small sizes. Cases in which sector acoustic logging in an open borehole has considerable advantages before a standard integrated method are described.

Key words. Well survey, log data interpretation, acoustic logging, casing string cementing quality control, well technical condition evaluation, sector and integrated acoustic equipment.

ВВЕДЕНИЕ. Одним из направлений развития стандартного акустического каротажа (АК) явилось создание секторной аппаратуры АК. Стандартные приборы акустического каротажа интегрального типа содержат один или несколько кольцевых источников и несколько кольцевых акустических приемников. В отличие от них секторные приборы АК состоят из одного или нескольких направленных акустических излучателей и групп приемников, расположенных по периметру прибора. Секторные приборы АК могут различаться количеством секторов, рабочей частотой излучателей, размерами зондов, возможностью их комбинирования со стандартными интегральными зондами АК.

В настоящее время в России и ближнем зарубежье секторные приборы акустического каротажа в основном применяются для оценки качества цементирования обсадных колонн. В первую очередь это связано с появлением на российском геофизическом рынке серийной аппаратуры МАК-СК, производство ОАО НПФ «Геофизика», г. Уфа.

Секторная акустическая цементометрия

Стандартные приборы АК интегрального типа, используемые для оценки качества цементирования, позволяют определять средние по периметру обсадной колонны характеристики сцепления цементного камня с обсадной колонной и породой, но не позволяют определять тип дефекта цементирования (объемный или контактный), оценивать его размеры и пространственную ориентацию. Кроме того, интегральные акустические цементометры имеют ограниченную чувствительность к объемным дефектам цементирования малых размеров, таким как

вертикальный канал, трещина или разрывы сплошности в цементном кольце. Чувствительность таких приборов зависит от размеров зондов, динамического диапазона, рабочих частот, предела допустимой погрешности аппаратуры. Проведенные модельные измерения для большого количества различной аппаратуры стандартного АКЦ показали, что вертикальные каналы раскрытостью меньше 45 град. не определяются.

Применение секторных приборов позволяет повысить чувствительность акустического метода на головных волнах к дефектам цементирования малых размеров. Результатом обработки данных, полученных секторными приборами, является построение карты цементирования, определение типа дефекта цементирования на границе «цемент-колонна», оценка размера дефектов и их пространственной ориентации относительно апсидальной плоскости скважины.

Конструктивно секторные приборы акустической цементометрии могут отличаться количеством акустических излучателей (от 1 до 9) и групп приемников (от 6 до 10), рабочей частотой излучателей (от 18 до 100 кГц), размерами зондов и количеством секторов, в которых определяется качество цементирования скважины. В высокочастотных (от 100 кГц) приборах используются секторные излучатели, а в низкочастотных (20 кГц) – один кольцевой излучатель.

Для эффективной оценки качества цементирования в высокоскоростных породах длина зонда секторных акустических цементометров устанавливается в диапазоне 0,3 – 0,6 м. Приборы, обладающие только одной группой приемников, обычно совме-

щаются со стандартными интегральными зондами для возможности калибровки данных секторного зонда. Приборы с большей рабочей частотой излучателей обладают лучшей чувствительностью к небольшим дефектам, однако предъявляют более высокие требования к центрации прибора в обсадной колонне в связи с большим влиянием децентрации прибора на регистрируемые амплитуды. Геометрия секторного прибора показана на рис. 1 на примере аппаратуры АКЦ-8С, производства ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма.

Среди секторных акустических цементомеров выделяется семейство, так называемых РАD систем, когда источники и приемники расположены на выносных лапах, которые прижимаются к стенкам обсадной колонны. Несомненным преимуществом таких приборов является отсутствие влияния децентрации, высокая вертикальная разрешающая способность, однако такие приборы значительно дороже и менее надёжны в использовании. В табл. 1 приведены характеристики секторных приборов зарубежного и российского производства. Наибольшее распространение в России для оценки качества цементирования получили однозондовые секторные приборы, совмещенные со стандартными трехэлементными интегральными зондами (МАК-9-СК, RBT, SBT).



Рис. 1.

Геометрия прибора АКЦ-8С, ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма

Программное обеспечение секторного акустического каротажа

Для обработки данных секторной акустической цементометрии ООО Предприятие «ФХС-ПНГ» разработало программный модуль, позволяющий проводить оценку качества цементирования по периметру скважины с построением карты цементирования [1, 2] (рис. 2).

Программное обеспечение позволяет:

- проводить обработку и интерпретацию данных, регистрируемых различными приборами секторной АКЦ;
- выполнять оценку качества цементирования по данным стандартной (интегральной) и секторной АКЦ;
- калибровать данные секторных зондов по данным интегрального зонда или по модельной записи;
- осуществлять привязку данных секторного прибора к показаниям стандартной АКЦ;
- оценивать величину и угол смещения прибора;
- проводить оценку достоверности результата расчета по величине погрешности определения времени волны по колонне;
- рассчитывать диаграмму и средние по окружности значения ослабления и индекса цементирования;
- вводить поправку в построенную карту цементирования за вращение прибора;
- оценивать качество сцепления и герметичности заколонного пространства.

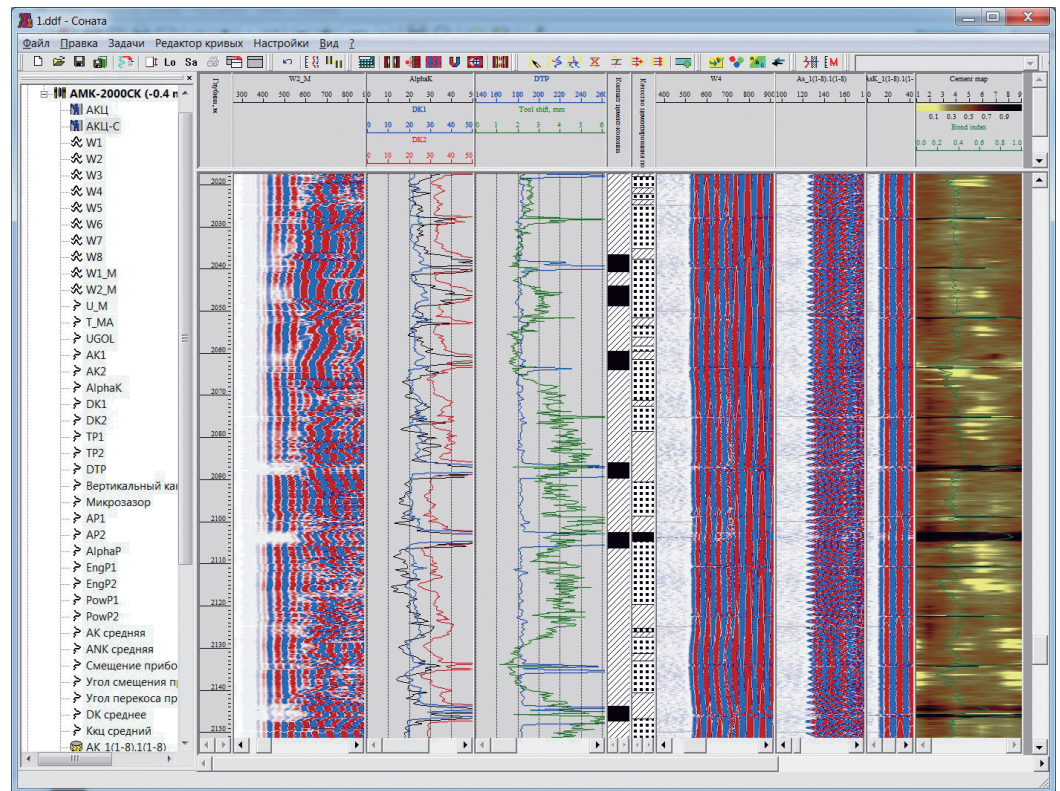
Результатом комплексной интерпретации стандартной и секторной АКЦ является характеристика гидроизоляции пластов. Разработанный программный модуль входит в состав программы «Соната», которая предназначена для оценки технического состояния скважин по комплексу геофизических методов, включающих акустическую цементометрию, гамма-гамма цементометрию-толщинометрию,

Таблица 1

Сравнительные характеристики секторных приборов АКЦ

Производитель	Название	Кол-во излучателей	Кол-во приемников	Рабочая частота, кГц	Вес, кг	Диаметр, мм	Длина, м	Макс. Т, °С	Макс Р, МПа	Доп. каналы	Примечание
Weatherford	Sector Bond Tool (Slim)	8 (1)	8 (6)	80 – 120	40 (35)	70 (43)	3,4 (5,3)	175 (215)	138	ГК, локатор муфт	
Baker Hughes	Segmented Bond Tool	6	6	100		85,7	10,1	177	138	ГК, локатор муфт	РАD система, возможна компенсированная оценка
Sondex (General Electrics)	Radial Bond Tool	1	8(6)	22 (18)	63 (18)	80 (43)	3	177	138	ГК, локатор муфт	
Geosys	USBA-segment	2	4	18	67	80	4	150	100		
Halliburton	RCBL	1	8		34(98)	43(80)	4,5 (4)	204 (180)			
ОАО НПФ «Геофизика», Уфа	МАК-СК, МАК-9-СК	8	8	100	70	100	3	120	80		
ООО «Нефтегаз-геофизика», Тверь	АКЦС	1	2 x 4	20	60	73	3,5	120	80		
ООО «ТНГ-Групп», Бугульма	АКЦ-8С	1	16(*)	5- 25	75	90	3,6 (5,6)	120	60		(*) – геометрия прибора см. Рис. 1, длина разная в зависимости от типа центраторов

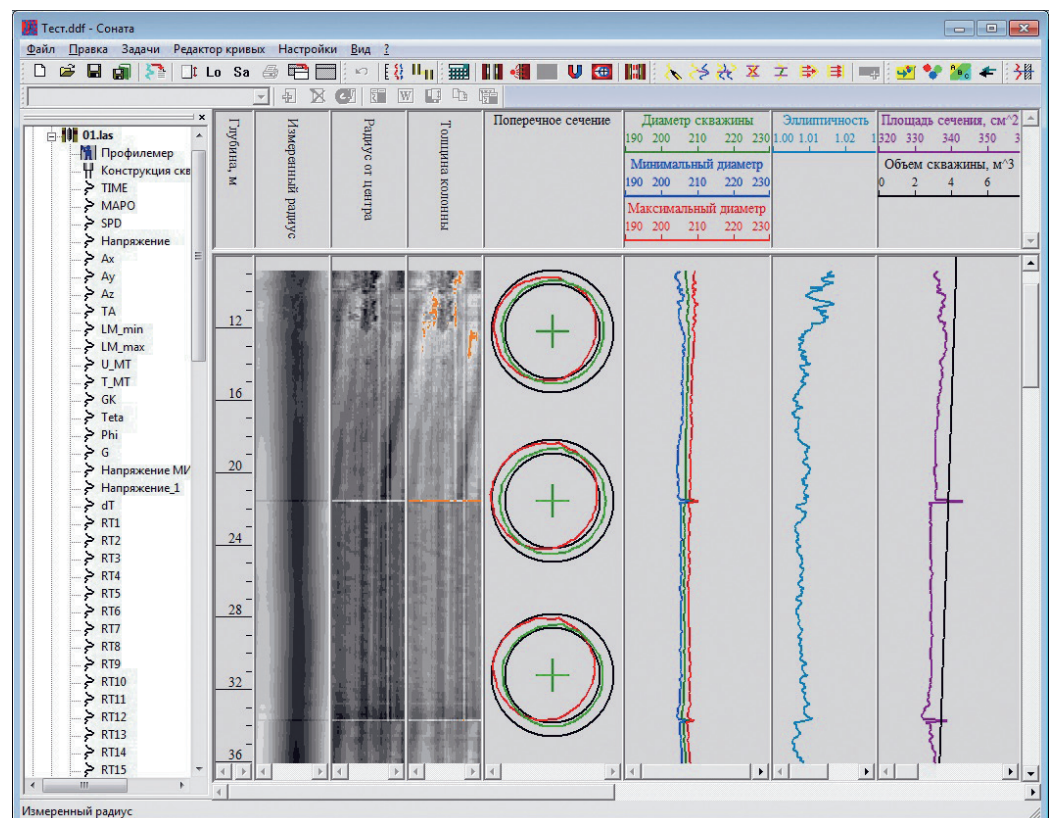
Рис. 2.
Пример обработки данных секторной акустической цементометрии в программе «Соната»



магнито-импульсную дефектоскопию, а также скважинную и трубную профилометрию. Программа «Соната» позволяет обрабатывать данные, регистрируемые любыми приборами акустического каротажа, гамма-гамма цементометрии-толщинометрии (в том числе серии СГДТ и ЦМ, производство НПФ «Геофизика»), магнито-импульсных дефектоскопов серии МИД-К и ЭМДСТ-МП [3, 4, 9], а также многоручажными профиломерами (рис. 3).

Опыт обработки и интерпретации данных секторной акустической цементометрии выявил следующие факторы, влияющие на качество и достоверность оценки технического состояния скважины. (Далее под высокочастотными приборами будут пониматься приборы типа МАК-СК с рабочей частотой излучателя 100 кГц, а под низкочастотными – приборы типа RBT с частотой излучателя 20 кГц).

Рис. 3.
Обработка данных профиломера в системе «Соната»



Калибровка прибора. Различие в чувствительности секторных датчиков приводит к появлению ложных аномалий на карте цементирования, поэтому необходимо контролировать работу прибора в калибровочной установке. Если амплитуды сигнала от разных датчиков отклоняются более чем на 15%, то прибор необходимо регулировать.

Децентрация прибора. Если прибор децентрирован в колонне, то время прихода волны по колонне для разных датчиков будет различным. При этом для высокочастотных приборов эта разница будет больше. Так для прибора МАК-СК при децентрации более 10 мм время прихода волны по колонне на разных приемниках может отличаться на 25-30 мкс, что соответствует трем периодам сигнала. Использование стандартного метода оценки амплитуды сигнала в фиксированном окне приводит либо к непопаданию сигнала по колонне в окно, либо приходу в окно волны от породы. В программе «Соната» для устранения этой проблемы используется автоматическое определение смещения прибора и коррекция окна в зависимости от величины децентрации прибора. Однако даже в этом случае амплитуды сигнала на разных датчиках могут отличаться в 2-3 раза, что приводит к построению неправильной «неравномерной» карты цементирования (рис. 4).

Высокоскоростная порода. Если скорость волны в породе равна или больше скорости волны по колонне, то измерение амплитуд волны по колонне становится затруднительным или невозможным. Использование короткого зонда ($L < 0.6$ м) и повышение частоты излучателя позволяют за счет задержки волны по породе на время пробега по цементу и колонне регистрировать 1-2 периода волны

по колонне без искажений. Другой способ – применение приборов с массивом датчиков (акустические антенны) и последующим разделением волн при обработке. Поэтому в условиях высокоскоростного разреза необходимо применять или короткий высокочастотные приборы (типа МАК-СК), или акустические антенны (типа ВАК-8).

Покрытие обсадной колонны. Антикоррозионное покрытие некоторых типов обсадных колонн нарушает контакт цемента с колонной. Высокочастотные приборы более чувствительны к наличию промежуточного слоя между колонной и цементом. Если такое покрытие не удалять, то оценка качества цементирования по АК будет искажена тем сильнее, чем выше частота излучателя прибора.

Микрозазоры. Влияние кольцевого микрозазора на показания приборов зависит от частоты излучателя. Стандартные приборы АКЦ не чувствительны к микрозазорам менее 10 мкм. Амплитуды волны по колонне, зарегистрированные высокочастотными приборами при микрозазоре 20 мкм и более, близки к амплитудам в свободной колонне. Сравнивая замеры высокочастотным и стандартным приборами, можно сделать вывод о наличии микрозазоров (рис. 5).

Облегченные цементы. В случае применения облегченных цементов необходимо при построении индекса качества цементирования и карты цементирования учитывать упругие свойства цемента. Например, если для обычного цемента диапазон затухания волны по колонне составляет 3-40 дБ/м, то для облегченного гелецемента используется диапазон от 3 до 21 дБ/м. В системе «Соната» возможен ввод зависимости индекса цементирования от свойств цемента.

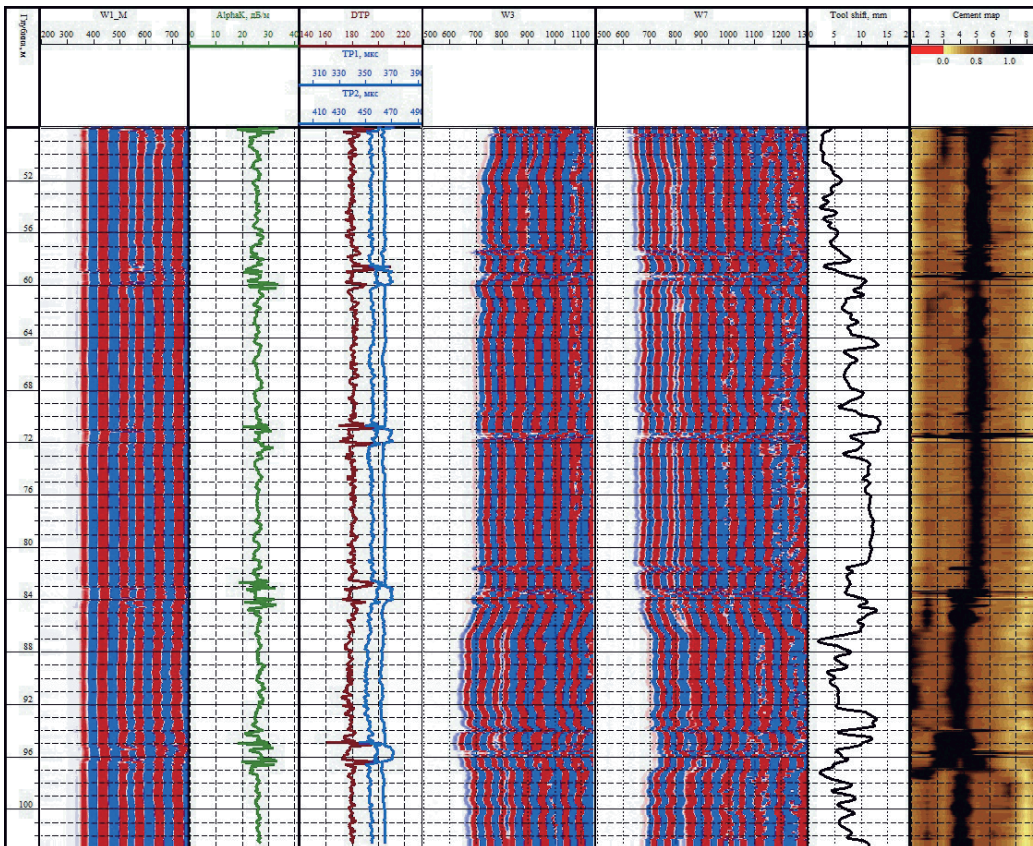


Рис. 4. Пример карты цементирования при децентрации прибора МАК-СК

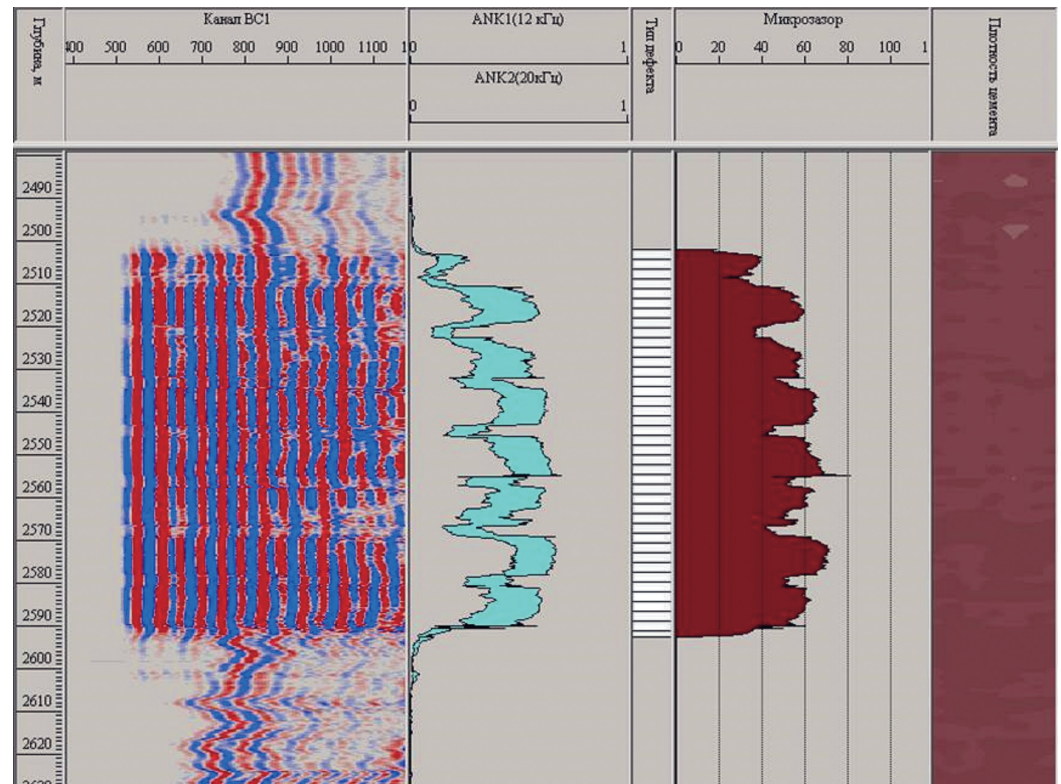


Рис. 5.

Оценка типа дефекта при измерениях на двух частотах (12 и 20 кГц)

Изменение свойств бурового раствора. Если акустические свойства жидкости в скважине значительно изменяются по глубине, то это может привести к ошибкам интерпретации. Знак ошибки (завышение или занижение качества цементирования) зависит от скважинных условий в интервале настройки. Если за пределами интервала настройки происходит повышение затухания акустического сигнала в жидкости, то качество цементирования в таких интервалах будет завышено. И наоборот, если ошибочно выбрать интервал настройки в интервале повышенного затухания сигнала в жидкости, то качество цементирования в целом будет занижено.

Изменение свойств бурового раствора по глубине может приводить к значительному изменению амплитуд акустического сигнала. Поскольку в случае стандартного АКЦ интерпретация данных выполняется по коэффициенту затухания волны по колонне, то изменение свойств раствора не влияет на результат интерпретации. В случае секторных однозондовых приборов ситуация иная. Даже в случае комплексирования прибора со стандартным интегральным зондом настройка расчета ослаблений амплитуд сигнала происходит только в определенном интервале глубин, поэтому при изменении свойств раствора по глубине необходима коррекция карты цементирования.

Таким образом, использование секторных приборов увеличивает разрешающую способность акустической цементометрии, позволяет выявлять каналы в цементном кольце раскрытостью от 6-10 град. Использование коротких высокочастотных секторных приборов типа МАК-СК по сравнению с низкочастотными аналогами типа RBT позволяет увеличить чувствительность метода мелким дефектам и определять качество цементирования в высокоскоростных разрезах [5]. Однако интерпретация

результатов исследований при децентрации прибора и изменении свойств бурового раствора вызывает значительные затруднения.

Решением названных проблем может стать разработка 2-х зондового секторного прибора. Такое решение позволит получать коэффициент затухания волны по колонне для каждого сектора и строить карту цементирования на основе коэффициента затухания, вместо амплитуд или ослаблений сигнала, которые больше подвержены влиянию мешающих факторов.

Применение секторного акустического каротажа для изучения свойств пород

В настоящее время в России и странах ближнего зарубежья для геофизических исследований скважин в открытом стволе практически не применяются приборы секторного АК, хотя в мировой практике опыт применения акустических приборов с секторными (азимутальными) приемниками известен. В каких случаях секторный акустический каротаж в открытом стволе имеет значительные преимущества перед стандартным интегральным методом?

В первую очередь, это проведение ГИС в наклонных и горизонтальных скважинах, когда вероятность децентрации прибора очень высока.

Если прибор децентрирован в скважине, то акустический сигнал проходит различные по длине пути до приемника и получаемый интегральный волновой сигнал, приходящий в приемник становится «размытым» (рис. 6). Аналогичный эффект может быть вызван не только децентрацией прибора в горизонтальном стволе, но и нецилиндричной формой вертикального ствола скважины. Время пробега уменьшается по сравнению с ожидаемым временем прихода волны, а погрешность в определении интервального времени волн резко возрастает.

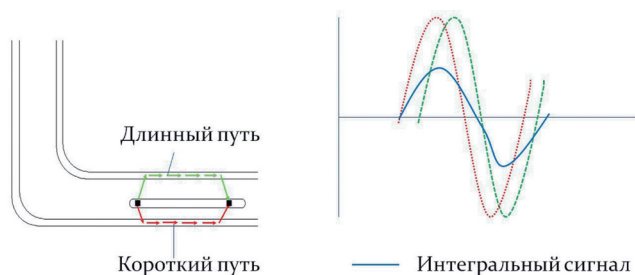


Рис. 6.

Искажение формы акустического сигнала при децентрации прибора АК

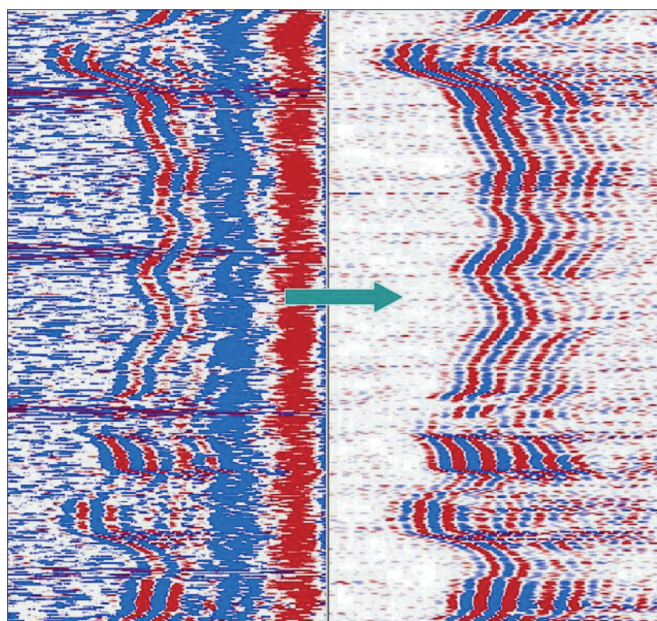


Рис. 7.

Исходный волновой сигнал низкого качества, зарегистрированный в горизонтальной скважине и тот же сигнал после обработки в системе «Соната»

На рис. 7 представлена запись АК, сделанная в горизонтальной скважине стандартным прибором АК. Качество исходной записи очень низкое. Проведенная предварительная обработка акустических данных в системе «Соната» позволяет увеличить соотношение сигнал/помеха и провести обработку, выделив продольную волну, однако даже в этом случае устранить влияние децентрации прибора невозможно, поэтому получаемое интервальное время имеет высокую погрешность.

В отличие от обычных интегральных приборов АК у секторных приборов акустический сигнал, приходящий в секторный приемник, не суммируется с сигналами из других направлений, поэтому менее подвержен эффекту «размывания». Интервальное время можно получить отдельно по каждому направлению, значительно уменьшая эффект децентрации прибора.

Примерами акустических приборов, использующих секторные секции приемников, специально разработанных для исследований в горизонтальных стволах и LWD системах, являются АВАК-3М

(Петроальянс), SoundTrak (Baker Hughes), QBAT (Halliburton), MSS (Weatherford). Так, например, автономный модуль волнового акустического каротажа АВАК-3М содержит один кольцевой излучатель и антенну из 8 групп приемников, каждая группа состоит из трех пьезокерамических приемников, расположенных под углом 120 градусов.

Секторные приборы акустического каротажа могут применяться для изучения азимутальной анизотропии. В настоящее время для этих целей в России и ближнем зарубежье используется дипольная и кросс-дипольная аппаратура типа АВАК-11 (ООО «Нефтегазгеофизика», г. Тверь), ВАК-8 (ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма), МРАЛ (CPL, Китай). Определение анизотропии в этом случае заключается в обработке матрицы зарегистрированных четырехкомпонентных данных. При стандартном дипольном каротаже значений скоростей поляризованных поперечных волн в двух плоскостях недостаточно для построения эллипса анизотропии скоростей, приходится привлекать перекрестные данные и выполнять преобразования, известные как «вращение Алфорда» [6]. Но даже при этом остается неопределенность при определении вектора анизотропии, которая может быть трудно разрешима при небольшом коэффициенте анизотропии.

Для разрешения этой неопределенности вместо кросс-дипольных приемников можно использовать секторные монополюсные приемники, каждый из которых регистрирует поляризованный акустический сигнал от кросс-дипольного источника. Примером таких приборов являются Sonic Scanner (Shlumberger), ХМАС-F1 (Baker Hughes), WaveSonic (Halliburton). В Sonic Scanner используется 13 групп восьмисекторных азимутально расположенных приемников, что позволяет провести 2 независимых построения эллипса анизотропии, тем самым значительно увеличив разрешающую способность и точность метода при определении анизотропии пород [7].

В работе [8] предлагается другой подход к решению данной проблемы. Для построения эллипса анизотропии А.Р. Князевым предложено применение 3-х плоскостного поляризационного акустического каротажа с 3-мя направленными асимметричными монополюсными излучателями и двумя (и более) блоками с аналогично размещенными 3-мя секторными приемниками. Такой подход, по мнению автора работы, полностью исключает неопределенность при расчете направления анизотропии.

Еще одним применением секторного акустического каротажа может стать использование таких приборов в качестве акустических профиломеров при условии регистрации скорости волны по жидкости.

Использование секторных акустических приборов при геофизических исследованиях в открытом стволе позволит увеличить эффективность исследований в наклонных и горизонтальных скважинах, при нецилиндричной форме ствола скважины, а в комплексе с дипольными излучателями эффективно решать проблему оценки азимутальной анизотропии.

Литература

1. Белов С.В., Заичкин Е.В., Наугольных О.В., Ташкинов И.В., Шумилов А.В., Гуляев П.Н., 2008, Модуль обработки данных секторной акустической цементометрии: М., РОСПАТЕНТ. Свид. №2008615595.

2. Белов С.В., Наугольных О.В., Шумилов А.В., Гуляев П.Н., 2009, Особенности оценки качества цементирования нефтегазовых скважин средствами секторной акустики: Новые достижения в технике и технологии ГИС:Уфа, 244-246.

3. Белов С.В., Заичкин Е.В., Наугольных О.В., Ташкинов И.В., Шумилов А.В. 2004. Модульная система обработки и интерпретации данных геофизических исследований скважин (СОНАТА): М., РОСПАТЕНТ. Свид. № 2004610273.

4. Ташкинов И.В., Шумилов А.В., 2010, «Соната» – современный программный комплекс для мониторинга технического состояния скважин: Материалы VI Китайско-Российского научного симпозиума по промышленной геофизике, Часть 2: Циндао, 188-201.

5. Сулейманов М.А., Исламгулов В.И., Гелеев Р.Р., 2010, Аппаратурно-методический комплекс АМК-200 СК сканирующего типа для контроля качества цементирования: Материалы VI Китайско-Российского научного симпозиума по промышленной геофизике, Часть 1: Циндао, 129-142.

6. Alford R. M., 1986, Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: 56th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 476-479.

7. Pistre V., Kinoshita T., Endo T., 2005, A Modular wireline sonic tool for measurements of 3D (azimuthal, radial and axial) formation acoustic properties: Transactions of the SPWLA 46th Annual logging symposium: New Orleans.

8. Князев А.Р., 2007, Новые способы выполнения акустического каротажа скважин и интерпретации полученных данных: Каротажник, **156**, 84-96.

9. <http://www.fxc-png.ru>.

Рецензент – доктор технических наук Гуторов Ю.А..

ОБ АВТОРАХ

БЕЛОВ
Сергей Владимирович

Заместитель генерального директора ООО Предприятие «ФХС-ПНГ», доцент кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета, кандидат технических наук.

Окончил в 1985 г. геологический факультет Пермского государственного университета. Область научных интересов – технология обработки и интерпретации данных ГИС, проектирование информационных систем, разработка программного обеспечения. Автор и соавтор 15 научных публикаций и 7 патентов на программные средства.



ТАШКИНОВ
Илья Владимирович

Генеральный директор ООО Предприятие «ФХС-ПНГ», кандидат технических наук. Окончил в 1995 г. механико-математический факультет Пермского государственного университета. Область научных интересов – автоматизация обработки и интерпретации данных ГИС, разработка программного обеспечения. Автор и соавтор 24 научных публикаций, 10 патентов на программные средства.

Окончил в 1995 г. механико-математический факультет Пермского государственного университета. Область научных интересов – автоматизация обработки и интерпретации данных ГИС, разработка программного обеспечения. Автор и соавтор 24 научных публикаций, 10 патентов на программные средства.



ГЛАДКИЙ
Сергей Леонидович

Программист ООО Предприятие «ФХС-ПНГ», доцент кафедры прикладной информатики Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета, кандидат физико-математических наук.

Окончил в 2002 г. факультет прикладной математики и механики Пермского государственного технического университета. Область научных интересов – математическое компьютерное моделирование, разработка программного обеспечения. Автор и соавтор 28 научных публикаций, в том числе 2 монографий.



ШУМИЛОВ
Александр Владимирович

Заместитель генерального директора ОАО «Пермнефтегеофизика» по промышленной геофизике, председатель правления Пермского отделения ЕАГО, доцент кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета, кандидат технических наук. Окончил в 1983 г. МИНХ и ГП им. И.М. Губкина по специальности «Горный инженер-геофизик». Область научных интересов – контроль технического состояния крепи нефтяных и газовых скважин, методы повышения нефтеотдачи пластов, геофизический мониторинг разработки месторождений, ГИС в скважинах специальных конструкций (горизонтальных, со стеклопластиковыми окнами). Автор и соавтор 117 публикаций, в том числе 3 монографий, 5 учебных пособий, 21 патента на изобретения, полезные технологические модели и программные средства.

Окончил в 1983 г. МИНХ и ГП им. И.М. Губкина по специальности «Горный инженер-геофизик». Область научных интересов – контроль технического состояния крепи нефтяных и газовых скважин, методы повышения нефтеотдачи пластов, геофизический мониторинг разработки месторождений, ГИС в скважинах специальных конструкций (горизонтальных, со стеклопластиковыми окнами). Автор и соавтор 117 публикаций, в том числе 3 монографий, 5 учебных пособий, 21 патента на изобретения, полезные технологические модели и программные средства.