

Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

УДК 550.832.44

*Н. А. Смирнов
ООО "Нефтегазгеофизика"*

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПОПЕРЕЧНОЙ ВОЛНЫ ПРИБОРАМИ ДИПОЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Доказывается наличие ограничений в величине интервального времени поперечной волны (ΔT_S) в нефтяных скважинах. Максимально возможное значение ΔT_S оценивается в 1100 мкс/м. Приводится сравнительный анализ результатов измерений приборами ведущих зарубежных фирм и отечественным прибором АВАК. Показано, что понижение частоты дипольного излучения и применение приемной антенны не дают положительного эффекта в расширении диапазона измеряемых значений ΔT_S .

Ключевые слова: дипольный акустический каротаж, упругие волны в скважине, измерение параметров поперечной волны, аппаратура волнового акустического каротажа.

Краткая история метода

Решение многих задач в нефтяных скважинах связано с определением динамических модулей упругости горных пород (сдвига, Юнга,

объемного сжатия, коэффициента Пуассона). Для определения этих важных механических параметров горных пород необходимо знать всего три геофизических параметра: объемную плотность и интервальные времена продольной и поперечной волн. Объемная плотность и интервальное время продольной волны давно и успешно измеряются радиоактивным (ГГК-П) и акустическим (АК) методами. Гораздо более сложной задачей оказалось измерение интервального времени поперечной волны. Дело в том, что на начальном этапе развития акустического метода применялись только монополюсные измерительные зонды. При монополюсном способе возбуждения упругих колебаний в скважине поперечная волна вступает после продольной волны и находится в зоне интерференции с продольной и поверхностными волнами, называемыми псевдорэлеевскими или отраженными коническими. Для выделения пакета поперечной волны в общей волновой картине монополюсного зонда разрабатывались различные способы. Наибольший успех пришелся на способ накопления когерентных колебаний с помощью многоканальной антенной решетки [15]. В акустическом каротаже один из вариантов этого способа получил название STC (Slowness-Time Coherence) [10]. Этот способ был применен к обработке данных цифрового монополюсного прибора Array Sonic фирмы Schlumberger, измерительный зонд которого содержал приемную антенну из восьми равномерно расположенных вдоль оси зонда приемников. Однако даже применение сложных систем наблюдения (зондов) и способов обработки данных не позволяло производить прямое измерение интервального времени поперечной волны (ΔT_S) в низкоскоростных геологических разрезах, когда $\Delta T_S \geq \Delta T_O$, где ΔT_O – интервальное время продольных колебаний в промысловой жидкости. Для этого использовали косвенный способ на основе соотношения между интервальными временами поперечной и поверхностной волны Стоунли в ее низкочастотном пределе [4]. Обычно низкочастотную волну Стоунли называли трубной волной. Такое определение было весьма неточным и не получило широкого применения в промысловой геофизике, поэтому поиски способа прямого измерения параметров поперечной волны продолжались. Уайт (J. White) предложил использовать противоположно расширяющиеся (дипольные) электроакустические преобразователи, положив тем самым начало новому методу, известному как дипольный акустический каротаж [20]. Первое сообщение о практическом применении

метода прямого измерения скорости поперечной волны в “мягких” горных породах с использованием каротажного зонда с дипольными преобразователями относится к 1980 г. [11]. Еще несколько лет шла интенсивная разработка теории метода и изготавливались опытные образцы скважинных приборов [1, 12, 24]. Появился первый в мире прибор с дипольным зондом для нефтяных скважин SWAL (Shear Wave Acoustic Log) фирмы Mobil [24]. В это же время были изготовлены и опытные образцы прибора АВАК в советском институте ВНИГИК, ныне ООО “Нефтегазгеофизика”. (Промышленное освоение аппаратуры в силу общественно-социальных преобразований в стране началось десятилетием позже [1].) В те годы дипольные измерения в нефтяных скважинах проводились в основном в научных целях, пока не появилась коммерческая аппаратура DSI (Dipole Sonic Imager) фирмы Schlumberger [21]. Скважинный прибор содержал оригинальный зонд с двумя скрещенными дипольными излучателями и приемной антенной из восьми элементов, по четыре пьезоэлектрических приемника в каждом. Причем принимаемые сигналы могли либо складываться при монополярном возбуждении упругих колебаний в скважине, либо попарно вычитаться при дипольном возбуждении, формируя набор волновых картин кроссдипольного зонда. DSI был также снабжен программным обеспечением обработки многоканальных данных. Была разработана и теоретическая основа для решения ряда специфических задач, таких как определение азимутальной анизотропии пород, направления напряжений и пр. Расширившиеся возможности акустического каротажа для решения задач нефтепромысловой геологии вызвали высокий интерес у нефтяных фирм, что повысило коммерческую привлекательность нового метода АК. Приборы аналогичные, а зачастую полностью повторяющие DSI, появились не только у ведущих американских фирм XMAC (Baker) [23], LFDT (Halliburton), но и у отечественных: ВАК-8 (Татнефтегеофизика) и др.

К вопросу о максимальных значениях интервального времени поперечной волны в породах, вскрываемых нефтяной скважиной

Поскольку основное предназначение дипольной акустики – измерение интервального времени поперечной волны в низкоскоростном разрезе, одним из основных показателей аппаратуры является диапазон

измеряемых параметров поперечной волны. Некоторые производители скважинных приборов в своих каталогах приводят значения интервального времени поперечной волны $\Delta T_S > 4000 \text{ мкс/м}$ [8, 19, 23]. Такие показатели аппаратуры дипольного акустического каротажа фирмы объясняют понижением частоты излучения дипольного излучателя до 1–2 кГц вместо 3–5 кГц у предшествующих модификаций и эффективностью приемных антенн [17]. Попытаемся разобраться в этом вопросе с точки зрения теории метода и практического опыта проведения измерений в нефтегазовых скважинах.

Взаимосвязь интервальных времен поперечной волны и волны Стоунли описывается формулой Био. На этом основан способ вычисления интервального времени поперечной волны по известному интервальному времени волны Стоунли, использовавшийся в эпоху монополярных зондов [2, 6, 14]. Формула Био в интервальных временах выглядит следующим образом:

$$\Delta T_{St} = \Delta T_O \cdot [1 + \sigma_0/\sigma \cdot (\Delta T_S/\Delta T_O)^2]^{1/2} \quad (1)$$

или, если выражение в скобках представить в модулях упругости,

$$\Delta T_{St}/\Delta T_O = [1 + (Kf/G)]^{1/2},$$

где ΔT_{St} – фазовое интервальное время волны Стоунли (трубной); ΔT_O – интервальное время в промывочной жидкости; ΔT_S – интервальное время поперечной волны; σ – объемная плотность горной породы; σ_0 – объемная плотность промывочной жидкости; $Kf = \sigma_0/\Delta T_O^2$ – модуль объемного сжатия промывочной жидкости; $G = \sigma/\Delta T_S^2$ – модуль сдвига горной породы.

Эта формула справедлива для любых значений отношений плотностей и коэффициентов Пуассона [4]. *Когда исследуются параметры поверхностных волн, необходимо иметь в виду, что они обладают частотной дисперсией скорости, то есть их фазовые и групповые скорости различаются, причем это различие зависит от частоты. У объемных волн, к которым относится продольная, частотная дисперсия отсутствует, то есть фазовая и групповая скорости одинаковые. Практически это выглядит как сохранение формы пакета колебаний при удалении от излучателя. У поверхностных волн форма пакета изменяется.* Из формулы (1) следует, что фазовое интервальное время трубной волны зависит от двух параметров – упругости промывочной жидкости Kf и модуля сдвига на стенке скважины G .

В реальных условиях интервальное время волны Стоунли, конечно, зависит и от других факторов, таких как диаметр скважины, наличие глинистой корки на стенке скважины и др. [3, 5, 6, 14]. Однако при длине волны много большей диаметра скважины, то есть когда волна Стоунли может рассматриваться как трубная, все факторы по своему влиянию на изменение интервального времени волны Стоунли на порядки уступают параметрам, входящим в формулу (1). Более того, в низкоскоростных разрезах, когда $\Delta T_S > \Delta T_O$, интервальное время трубной волны чувствительно к изменению модуля сдвига и соответственно взаимная корреляция ΔT_{St} и ΔT_S весьма тесная [6].

Известно, что как трубная, так и поперечная волны существуют только в том случае, когда окружающая скважину среда имеет сдвиговую упругость, то есть модуль сдвига $G > 0$. При этом трубная волна имеет частотную дисперсию интервального времени, изменяющегося от ΔT_O на высоких частотах до $\Delta T_O/0,7$ при нулевой частоте. Если окружающая среда очень “мягкая”, то есть $\Delta T_S > \Delta T_O/0,7$, то трубная волна быстро затухает из-за расхождения фронта [5]. Она не наблюдается уже в нескольких сантиметрах от излучателя. Таким образом, значение интервального времени поперечной волны, при котором в скважине может наблюдаться трубная волна, равно

$$\Delta T_S \leq \Delta T_O/0,7. \quad (2)$$

Учитывая, что значение ΔT_O в скважине практически не бывает более 650 мкс/м (интервальное время продольных колебаний в пресной воде при атмосферном давлении), из формулы (2) следует, что $\Delta T_S \leq 930$ мкс/м.

Обратимся к уравнению (1) и представим его в форме, удобной для анализа соотношений интервальных времен:

$$(\Delta T_{St}/\Delta T_S)^2 = \sigma_0/\sigma + (\Delta T_O/\Delta T_S)^2,$$

или, принимая во внимание неравенство (2), можно записать

$$(\Delta T_{St}/\Delta T_S)^2 \geq \sigma_0/\sigma + (0,7)^2. \quad (3)$$

Поскольку отношение объемных плотностей в реальной скважине обычно не менее 0,5, то есть $\sigma_0/\sigma \geq 0,5$, получаем

$$\Delta T_{St}/\Delta T_S \geq 1, \text{ или } \Delta T_{St} \geq \Delta T_S. \quad (4)$$

Следовательно, обе волны (поперечная в сигналах дипольных зондов и Стоунли в сигналах монополярных зондов) могут наблю-

даться только в тех породах, где интервальное время поперечной волны $\Delta T_S \leq 930$ мкс/м. В случае еще более “мягких” горных пород волна Стоунли исчезает в волновой картине. Возможность измерения параметров поперечной волны при значениях ее интервального времени больших, чем у трубной волны из-за слишком низкого значения модуля сдвига, также отсутствует. Таким образом, предельное значение для интервального времени поперечной волны и волны Стоунли равно 930 мкс/м (предельно максимальное значение). Во всех реальных горных породах интервальное время трубной волны больше интервального времени поперечной волны. С учетом того что поперечная волна и волна Стоунли имеют разную поляризацию [12, 14] и принимая во внимание наличие анизотропии в породе, можно допустить погрешность в оценке максимального значения интервального времени поперечной волны в пределах ± 100 мкс/м. Таким образом, исходя из основных постулатов теории акустического каротажа, максимальное значение интервального времени поперечной волны, которое может иметь место в нефтяной скважине и быть измерено путем расположения измерительной системы (зонда) в скважине, заполненной промывочной жидкостью, находится вблизи 1000 мкс/м и не превосходит 1100 мкс/м.

Можно найти и физическое объяснение предела реальных измерений интервального времени поперечной волны. Общеизвестно, что в осадочных породах (в которых содержится 99% всех месторождений нефти и газа) максимальная (критическая) пористость составляет около 40% [16]. При более высоком коэффициенте пористости порода теряет жесткий скелет и превращается в суспензию, в которой не могут существовать колебания сдвига. Оценим, при каком значении интервального времени поперечной волны осадочная порода имеет коэффициент пористости $PALP = 0,4$. Воспользуемся для этой цели известными эмпирическими уравнениями, связывающими коэффициент пористости с интервальным временем продольной волны [18, 22], а также тем фактом, что коэффициент Пуассона осадочных пород $\nu = f(\Delta T_S / \Delta T_P)$ практически не бывает больше 0,4, то есть $\Delta T_S / \Delta T_P \leq 2,5$.

Положив значение интервального времени скелета породы $\Delta T_{Ps} = 180$ мкс/м, а пластового флюида $\Delta T_{Pf} = 650$ мкс/м, получим согласно уравнению Уилли [22] $\Delta T_P = \Delta T_{Pf} \cdot PALP + (1 - PALP) \cdot \Delta T_{Ps} = 368$ мкс/м; $\Delta T_S \leq 920$ мкс/м.

По уравнению Реймера [11] $\Delta T_P = \Delta T_{Ps} \cdot \Delta T_{Pf} / [(1 - PALP)^2 \cdot \Delta T_{Pf} + PALP \cdot \Delta T_{Ps}] = 383 \text{ мкс/м}$; $\Delta T_S \leq 958 \text{ мкс/м}$.

Получаются оценки максимального значения ΔT_S для осадочных горных пород, сопоставимые с теоретическими. Итак, максимальное значение интервального времени поперечной волны в осадочных горных породах не превышает 1100 мкс/м. Указываемые в фирменных каталогах значения интервального времени поперечной волны, в три–четыре раза превышающие теоретическое значение, разве что могут относиться к параметрам сред, не существующих в нефтегазовых скважинах.

Волновое поле дипольного зонда

Наличие данных дипольного зонда еще не гарантирует точное измерение интервального времени поперечной волны. Так же как в волновой картине монопольного зонда присутствуют пакеты поверхностных волн с амплитудами, значительно превосходящими амплитуды объемных волн, среди волновых пакетов дипольного зонда регистрируется мощная *изгибная* волна, которая составляет основную долю энергии регистрируемой волновой картины [12]. Изгибная волна является поверхностной и, следовательно, имеет частотную дисперсию, однако в низкочастотном пределе (когда частота в спектре стремится к нулю) ее скорость приближается к скорости поперечной волны [9]. Это свойство изгибной волны используется для определения интервального времени поперечной волны. Однако надо иметь в виду, что в силу разной природы обеих волн скорости распространения их пакетов колебаний различаются, и весьма существенно, причем скорость изгибной волны меньше скорости поперечной волны и зависит от частоты. Скорость распространения поперечной волны определяется модулем сдвига и объемной плотностью массива горной породы, скорость пакета изгибной (поверхностной) волны зависит от тех же параметров на стенке скважины. На рис. 1 показана форма волновой картины дипольного зонда. Первые фазы представляют колебания поперечной волны. Колебания с амплитудами большими, чем амплитуды колебаний поперечной волны, представляют изгибную волну.

Показанная на рис. 1 форма сигналов дипольного зонда позволяет для измерения параметров распространения поперечной волны при-

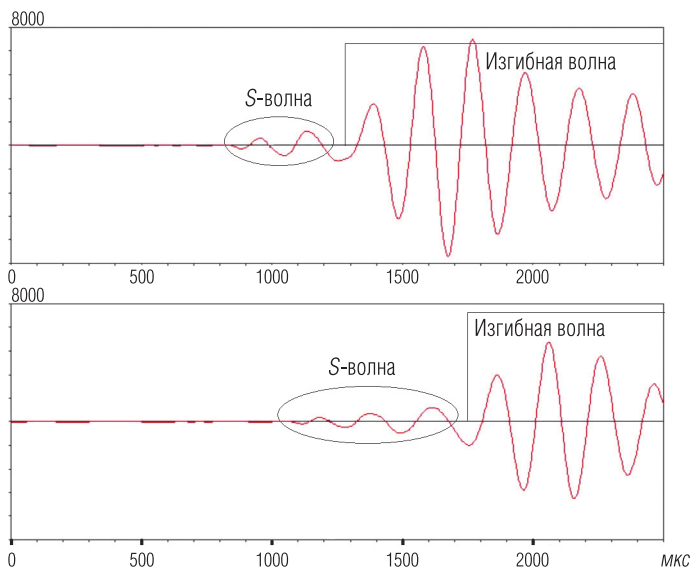


Рис. 1. Типичная форма волновых картин дипольного зонда. Овалами выделены колебания, обусловленные волной сдвига, то есть поперечной S-волной. Прямоугольниками обозначены колебания изгибной, поверхностной волны

менять различные способы обработки данных (волновых картин в цифровом виде). Существуют два принципиально различных способа определения интервального времени поперечной волны по волновым картинам дипольных зондов.

1. Прямое измерение по первым фазам колебаний. Этот способ дает непосредственно интервальное время поперечной волны и не требует корректировок, хотя иногда приходится иметь дело с невысоким отношением сигнал/шум [7].
2. Путем вычисления интервального времени низкочастотного предела изгибных колебаний, то есть интервальное время поперечной волны определяется через интервальное время поверхностной волны [9]. В этом случае производится спектральный анализ всей волновой картины и строится дисперсионная кривая “интервальное время (ΔT) – частота (f)”. Экстраполируется полученный график зависимости до значения частоты, равной нулю. Определенное таким способом интервальное время принимается в качестве ΔT_S .

Этот метод весьма затратный по времени и подвержен ошибочным оценкам в условиях малых амплитуд сигналов и при узком частотном спектре колебаний, поэтому до сих пор для его реализации интенсивно разрабатываются все новые алгоритмы [13].

Для реализации первого способа достаточно иметь простой трех-элементный зонд и алгоритм обработки, основанный на выделении и измерении интервального времени первых вступлений волновой картины. Этот способ нашел применение в аппаратуре SWAL [7, 21], он же использован и в АВАК.

Второй способ используется для обработки данных длинных зондов с приемной антенной. Именно такая конфигурация зонда практиковалась фирмой Schlumberger в аппаратуре АК, существовавшей на момент появления дипольных систем. Зонд DSI имеет конфигурацию, аналогичную зонду Array Sonic. Первоначально и для обработки данных дипольных зондов с антенной приемников использовался способ STC с внесением поправок на дисперсию изгибной волны. Ввиду того что способ STC не всегда пригоден для обработки колебаний волн со значительной дисперсией скорости и часто приводит к неверным результатам, были разработаны алгоритмы, учитывающие дисперсию скорости поверхностной волны как Стоунли, так и изгибной [9]. Вслед за Шлюмберже этот способ обработки данных подхватили и другие фирмы, практикующие аналогичные зонды.

Таким образом, при проведении дипольных измерений надо иметь в виду не только существование предельных значений измеряемых параметров волн, но и учитывать возможные ошибки при применении алгоритмов обработки данных, которые могут приводить к ошибочным оценкам механических параметров горных пород.

Следует отметить, что еще на ранней стадии развития метода проводились работы по сравнению двух направлений в дипольном акустическом каротаже [21]. Сравнивались в том числе и способы обработки данных. Отмечалось, что оба способа дают сопоставимые результаты, хотя использовавшийся в то время метод STC требовал больше хлопот по введению коррекции из-за дисперсии изгибной волны. Такую коррекцию необходимо вводить независимо от частотного спектра излучения. Даже при очень низкой частоте излучения (менее 1 кГц) интервальное время изгибной волны, измеренное по фазам пакетов колебаний, отличается от интервального времени волны поперечной, причем интервальное время меняется от фазы к фазе

из-за частотной дисперсии. Следовательно, применение акустической приемной антенны автоматически предполагает использование спектральных способов обработки данных.

Сравнительный анализ результатов измерений

Рассмотрим несколько примеров сравнительных скважинных испытаний технологии АВАК с аналогами ведущих американских фирм. Результаты измерений американских фирм предоставлены производственными организациями, для которых производились эти испытания, в той форме, в которой они содержались в заключениях фирм.

Кроссдипольный прибор Weatherford. Низкоскоростной разрез $\Delta T_S > \Delta T_O$

Ответить на вопрос, действительно ли понижение частоты дипольного излучателя и применение антенны из восьми приемников расширяет диапазон измерения интервального времени поперечной волны, позволяют результаты сравнительных испытаний кроссдипольного прибора фирмы Weatherford и АВАК-11 в одной из скважин, вскрывших низкоскоростные (“мягкие”) породы. Основные результаты испытаний представлены на рис. 2.

Как следует из сопоставления фазокорреляционных диаграмм (ФКД), видимая частота сдвиговых мод дипольных зондов прибора Weatherford минимум в два раза ниже, чем у АВАК (широкие линии в колонках ФКД дипольных зондов). Однако в интервале 996–1025 м (интервал отмечен желтой заливкой в колонках ФКД) на дипольных зондах обоих приборов полностью исчезли колебания сдвига, причем на их месте возникли высокоамплитудные высокочастотные колебания с интервальным временем, соответствующим времени продольной волны. В заключении по этой скважине отсутствуют данные об интервальном времени поперечной волны (сиреневая кривая во второй колонке) и, естественно, о модулях упругости горных пород в этом и других подобных интервалах. Фирма Weatherford объясняет это размывом ствола скважины. Действительно, кривая кавернометрии (CALI) в первой колонке показывает наличие слегка размывтой стенки скважины.

Однако следует обратить внимание на тот факт, что увеличение диаметра и неровность стенки не помешали уверенному измерению интервального времени продольной волны (ΔT_p во второй колонке). Кроме того, сдвиговые колебания, вызванные дипольными излучателями, именно в этом интервале превратились в колебания, эквивалентные монополюсному у обоих приборов, то есть измерение интервального времени поперечной волны стало невозможным, причем независимо от частоты излучения. Все это указывает на то, что причиной отсутствия сдвиговых колебаний является не размыв стенки, а скорее наоборот, размыв стенки появился в результате отсутствия у горной породы сдвиговой упругости, что и сделало ее рыхлой и подверженной размыву. Действительно, вмещающие породы характеризуются интервальным временем продольной волны $\Delta T_p = 390\text{--}420$ мкс/м и поперечной волны $\Delta T_s = 900\text{--}1046$ мкс/м, то есть интервальные времена имеют значения, близкие к предельным значениям для существования поперечных колебаний. В этой ситуации естественно ожидать, что в выделенном интервале, где ΔT_p увеличилось еще на $20\text{--}50$ мкс/м по сравнению с вмещающими породами, исчез модуль сдвига и вместе с ним колебания сдвига, хотя интервальное время поперечной волны должно быть в интервале $1050\text{--}1200$ мкс/м.

Таким образом, использование низкочастотного излучателя и антенны из восьми приемников в приборе фирмы Weatherford не показало преимуществ в отношении расширения диапазона измеряемых параметров упругих волн. Значения интервальных времен продольной волны обоих приборов совпадают до погрешности измерения, равно как и значения интервальных времен поперечной волны, что и гарантировало практическое совпадение значений коэффициента Пуассона. Небольшие расхождения между значениями ΔT_s в нижней части представленного интервала носят эпизодический характер и могут быть отнесены к случайным погрешностям при обработке данных, тем более что они не превышают двух погрешностей измерения при значениях параметра, близких к критическим. В силу того что $\Delta T_{sw} > \Delta T_s$ АВАК, погрешность можно отнести к недоучету поправки на дисперсию изгибной волны в параметре ΔT_{sw} , через которую определяется интервальное время в приборе Weatherford.

Сравнительные испытания АВАК и ХМАС.

Разрез с умеренными интервальными временами ($\Delta T_S \leq \Delta T_O$)

Рассмотрим еще один пример сравнения результатов измерений с использованием аппаратуры АВАК и ХМАС фирмы Baker Atlas. Параметры зонда ХМАС по частоте излучения и наличию приемной антенны аналогичны прибору Weatherford. На рис. 3 приведены результаты измерений в скважине, находящейся в породах с умеренными упругими свойствами, то есть в которых интервальное время поперечной волны не превышает интервального времени продольной волны в промысловой жидкости. В то же время породы не очень упругие из-за высокой глинистости. Диаметр скважины в представленных интервалах превышает на 20–50 мм номинальное значение 216 мм. В целом результаты измерений интервальных времен обоими приборами сопоставимы, хотя имеются некоторые различия, на которые следует обратить внимание.

Кривые интервальных времен как продольной, так и поперечной волн прибора ХМАС сильно сглажены по сравнению с аналогичными кривыми АВАК, результатом чего явилась и различная форма кривых коэффициента Пуассона. Данный факт обусловлен особенностями алгоритмов обработки данных, а именно: обработка данных приемной антенны прибора ХМАС приводит к усреднению определяемого параметра. В данном конкретном случае это не имеет большого значения, однако при необходимости оценки тонких пластов такой способ вычисления приводит к потере информации в маломощных пластах. Интервальные времена продольной волны обоих приборов совпадают с учетом вышеотмеченных особенностей. Что касается интервального времени поперечной волны, то в верхнем интервале 1988–2018 м значения, полученные обоими приборами, более-менее совпадают, но в нижнем интервале 2074–2100 м интервальное время поперечной волны по прибору ХМАС систематически на несколько десятков микросекунд превышает интервальное время поперечной волны АВАК (черная и синяя сплошные линии соответственно). В результате различий в ΔT_S дипольных зондов различаются и значения коэффициента Пуассона. Чтобы выяснить, какая из кривых ΔT_S ближе к интервальному времени поперечной волны, они сравниваются с аналогичной кривой монополярного зонда, которая в этом разрезе уверенно выделяется и измеряется.

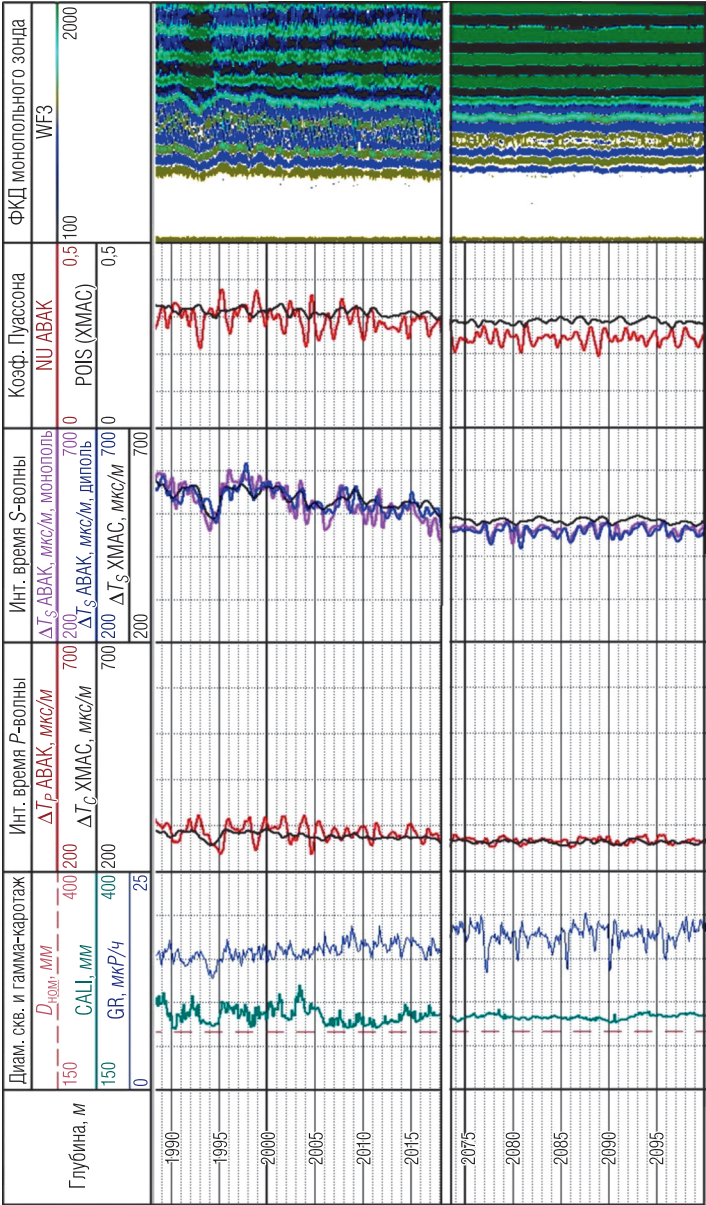


Рис. 3. Сравнение дипольных измерений в умеренном разрезе: в первой колонке приведены кривые кавернометрии и гамма-каротажа, во второй – интервальное время продольной волны, в третьей – интервальное время поперечной волны, в четвертой – коэффициент Пуассона, в крайней правой – ФКД короткого монополярного зонда 8 кГц; параметры волн, измеренные аппаратурой ХМАС, изображены черными сплошными линиями

Интервальное время, определенное по волновым картинам монополярного зонда, соответствует поперечной волне, и оно совпало с интервальным временем, определенным по данным дипольного зонда АВАК. Следовательно, не всегда измеренные значения интервального времени дипольного зонда соответствуют истинным значениям интервального времени поперечной волны. В случае определения интервального времени поперечной волны через параметры изгибающей волны, что реализовано в американских приборах, могут возникать существенные ошибки, в зависимости от используемых программных средств и опыта обработчика данных.

***Сравнение АВАК и Sonic Scanner (SS) Schlumberger.
Высокоскоростной разрез $\Delta T_S < \Delta T_O$***

Следует отдать должное сотрудникам фирмы Schlumberger, внесшим настолько существенный вклад в прикладное развитие метода, что без них метод дипольного акустического каротажа, возможно, так и остался бы на уровне опытных образцов и эпизодических научных публикаций. Авторитет фирмы Schlumberger настолько велик, что практически все наши заказчики специально проводят сравнительные испытания, прежде чем приступить к производственному применению АВАК. Результаты сравнения измеренных основных параметров волн в одной из скважин приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, значения интервальных времен продольной и поперечной волн совпадают с точностью до погрешности измерения. Так же как и в случае с аппаратурой ХМАС у SS наблюдается эффект “заглаживания” параметров волн, особенно это заметно на значениях коэффициента Пуассона, хотя этот эффект не столь значителен, как в случае с параметрами ХМАС. В интервале глубин 4065–4082 м (участок с наибольшими значениями интервальных времен) имеет место небольшое, но систематическое различие в интервальных временах поперечной волны и соответственно в значениях коэффициента Пуассона. Как и в предыдущем случае, это связано с недоучетом дисперсии изгибающей волны. Значения интервальных времен волны Стоунли имеют одинаковую конфигурацию, но различаются на 30–60 мкс/м, причем большие значения получены по технологии SS. Это различие обусловлено способом измерения параметров волны, имеющей частотную дисперсию.

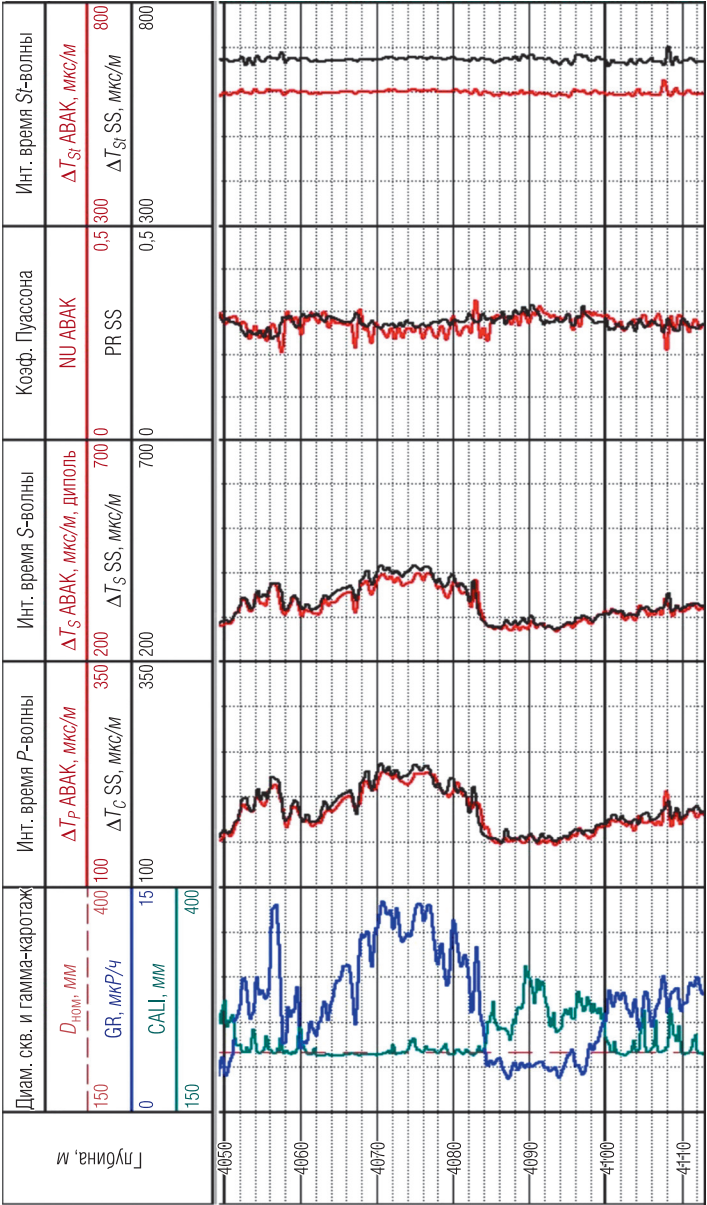


Рис. 4. Сравнительные испытания АВАК и Sonic Scanner в высокоскоростном разрезе; в первой колонке находятся кривые кавернометрии и гамма-каротажа; вторая–пятая колонки содержат последовательно интервальные времена продольной, поперечной волн, коэффициент Пуассона, интервальное время волны Стоунли; параметры волн, полученные АВАК, изображены красными сплошными линиями, а Sonic Scanner – черными

В технологии АВАК производится прямое измерение фазового интервального времени волны Стоунли, возбуждаемой специальным низкочастотным излучателем. В SS измерение производится методом накопления когерентных колебаний, поэтому полученные значения интервального времени соответствуют групповым (более 700 мкс/м).

Из приведенных примеров очевидно, что многоканальные приемные антенны не дают преимуществ при проведении акустических измерений в нефтяных скважинах и вносят искажения даже в простейших условиях высокоскоростного разреза. Следует также отметить, что антенны требуют тщательного ухода и настройки идентичности отдельных приемников. Если каналы не идентичны, то антенна не только не помогает проводить измерения, но и искажает их.

Выводы

1. Метод дипольного акустического каротажа, как и любой геофизический метод, имеет ограничения по диапазону измеряемых параметров. Поперечная волна, являющаяся основным объектом измерений “дипольной акустики”, не может быть измерена в породах, в которых модуль сдвига стремится к нулю.
2. Интервальные времена поперечной волны и волны Стоунли всегда имеют тесную взаимную корреляцию, так как главным фактором, влияющим на эти волны, является модуль сдвига горных пород, окружающих скважину.
3. Интервальное время поперечной волны в реальной геологической среде нефтяной скважины не может быть больше интервального времени волны Стоунли (трубной волны) в низкочастотном пределе, то есть $\Delta T_S \leq \Delta T_{St}$. Если интервальное время поперечной волны приближается к интервальному времени трубной волны, колебания обеих волн образуют единую интерференционную картину. Разделение волн становится проблематичным. Чтобы продолжить измерение параметров поперечной волны, по крайней мере необходимо, чтобы колебания типа волны Стоунли отсутствовали в волновой картине дипольного зонда.
4. Для геологических разрезов нефтяных скважин предельные максимальные значения интервального времени поперечной волны не превышают 1100 мкс/м.

5. Измерения в скважинах с использованием аппаратуры различных производителей подтверждают наличие ограничений для формирования сдвиговых колебаний в окружающих скважину породах.
6. Сравнительные скважинные испытания аппаратуры АВАК и аппаратуры ведущих американских фирм показали, что зарубежные аналоги не имеют преимуществ в измерении основных параметров волн. Более того, американская аппаратура, использующая не прямое измерение параметров, зачастую завышает значения интервальных времен сдвиговых волн – поперечной и Стоунли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козяр В. Ф., Смирнов Н. А., Белоконов Д. В., Козяр Н. В. Измерение параметров упругих волн зондами с монополярными и дипольными преобразователями (результаты промышленных испытаний) // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 1998. Вып. 42. С. 14–30.
2. Крауклис П. В., Перельман А. Л., Рабинович Г. Я. Об одном способе определения скоростей поперечных волн при акустическом каротаже // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Недра, 1971. Вып. 9. С. 63–71.
3. Смирнов Н. А., Крауклис Л. А., Крауклис П. В. К вопросу использования волны Лэмба для определения фильтрационных свойств горных пород // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Недра, 1987. Вып. 27. С. 159–170.
4. Biot M. A. Propagation of Elastic Waves in Cylindrical Bore Containing a Fluid // Journal of Applied Physics. 1952. Vol. 23. № 9. P. 997–1005.
5. Cheng C. H., Toksoz M. N. Generation, Propagation and Analysis of Tube Waves in a Borehole // SPWLA 23^d Annual Logging Symposium. 1982.
6. Cheng C. H., Toksoz M. N. Determination of Shear Wave Velocities in “Slow” Formations // SPWLA 24th Annual Logging Symposium. 1983.
7. Chen S. T. Shear-Wave Logging with Dipole Sources // Geophysics. 1988. Vol. 53. № 5. P. 659–667.
8. Compact Cross-Dipole Tool // <http://www.weatherford.com/doc/wft129527>
9. Kimball C. V. Shear Slowness Measurement by Dispersive Processing of Flexurel Mode // Geophysics. 1998. Vol. 63. № 2. P. 337–344.
10. Kimball C. V., Marzetta T. L. Semblance Processing of Borehole Acoustic Array Data // Geophysics. 1984. V. 49. № 3. P. 274–281.
11. Kitsunezaki C. A New Method for Shear Wave Logging // Geophysics. 1980. Vol. 45. № 10. P. 1489–1506.
12. Kurkjian A. L., Chang S.-K. Acoustic Multipole Sources in Fluid-Filled Boreholes // Geophysics. 1986. Vol. 51. № 1. P. 148–163.

13. *Li W., Tao G., Matuszyk P. J., Torres-Verdin C.* Forward and Backward Amplitude and Phase Estimation Method for Dispersion Analysis of Borehole Sonic Measurements // *Geophysics*. 2015. Vol. 80. № 3. P. D295–D308.
14. *Liu O. Y.* Stoneley Wave-Derived ΔT Shear Log // *SPWLA 25th Annual Logging Symp.* 1984.
15. *Neidell N. S., Taner M. T.* Semblance and Other Coherency Measures for Multichannel Data // *Geophysics*. 1971. Vol. 36. № 3. P. 482–497.
16. *Nur A., Mavko G., Dvorkin J., Galmudi D.* Critical Porosity: A Key to Relating Physical Properties to Porosity in Rocks // *The Leading Edge*. 1998. № 3. P. 357–362.
17. *Pistre V., Sinha B. et al.* A New Modular Sonic Tool Provides Complete Acoustic Formation Characterization // *Expanded Abstracts: Presented at 71-st SEG Annual Meeting*. 2005. P. BG24.
18. *Raymer L. L., Hunt E. R., Gardner J. S.* An Improved Sonic Transit Time to Porosity Transform // *SPWLA 21 Annual Logging Symposium*. 1980.
19. *Sonic Scanner* // http://www.slb.com/~media/Files/evaluation/catalogs/2015_wireline_services_catalog.pdf
20. *White J. E.* Acoustic Logging Tool Having Opposed Transducers: pat. 3593255 US: МПК G01V1/00. Заявл. 29.05.1969; опубли. 13.07.1971.
21. *Williams D. M., Cowper D. R., Nieto J. A., Hurley M. T., Schmitt D. P.* Shear Wave Acoustic Logging in Slow Formations – Examples and Problems // *40th European Formation Evaluation Symposium*. London, 1991. P. D1–D25.
22. *Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner L. W.* Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media // *Geophysics*. 1956. Vol. 21. № 1. P. 41–70.
23. *XMAC F1* // <http://www.bakerhughes.com/products-and-services/evaluation/openhole-wireline-services/petrophysics/acoustic-logging-services/xmac-f1-acoustic-service>
24. *Zemanek J., Angona F., Williams D. M., Caldwell R. L.* Continuous Acoustic Shear Wave Logging // *SPWLA 25th Annual Logging Symposium*. 1984.

Рецензент доктор техн. наук В. М. Коровин