

УДК 550.834.015.2

Н. А. Смирнов

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СДВИГОВОЙ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД ОТНОСИТЕЛЬНО УПРУГИХ СВОЙСТВ В СКВАЖИНАХ

Экспериментально, путем проведения измерений дипольными электроакустическими преобразователями в модели азимутально-анизотропной среды, показан эффект расщепления поляризованной поперечной волны по двум направлениям: быстрому и медленному. В контролируемых условиях лабораторной модели изучена динамика и спектральный состав поляризованных поперечных волн. Проведено тестирование программы обработки данных аппаратуры АВАК. Доказана достоверность определений параметров упругой анизотропии горных пород как в модели, так и в реальной скважине.

Ключевые слова: физическое моделирование, дипольные измерения, упругая анизотропия, волновой акустический каротаж.

Введение

В последние годы в практике геофизических работ в нефтяных скважинах применяется технологический комплекс АВАК (аппаратура волнового акустического каротажа). Автору настоящей статьи, которым выполнена данная разработка, часто приходится отвечать на вопросы об отличительных особенностях технологии данного метода, связанных с проведением кроссдипольных измерений и расчетом параметров упругой анизотропии горных пород. Следует отметить, что принципиально технология АВАК аналогична широко используемой зарубежными фирмами каротажной технологии определения акустической анизотропии горных пород и подробно описана в многочисленных работах зарубежных исследователей [3, 6, 8, 10]. Отличие состоит в способе измерения интервальных времен поперечных волн. В иностранных технологиях измерение производится путем определения интервального времени пакета колебаний, регистрируемых дипольными зондами, в низкочастотном пределе путем построения дисперсионной зависимости интервального времени от частоты. В технологии АВАК реализуется прямое измерение интервального времени поперечной волны, регистрируемой в первых вступлениях волновых картин дипольных зондов [7, 9]. Используемый в АВАК способ измерения реализуется за счет применения более коротких в

сравнении с другими технологиями зондов (менее 2 м). Поскольку колебания поперечной волны уверенно регистрируются в первых вступлениях волновых картин дипольных зондов, отпадает необходимость в применении приемных антенн, предполагающих большой объем регистрируемых данных и сложные алгоритмы их обработки на основе накопления когерентных колебаний. В АВАК применены трехэлементные зонды и алгоритмы фазовой корреляции волн, что, вероятно, и явилось предпосылкой к массовому использованию данной технологии в России. Вместе с тем этот способ измерения позволяет произвести оценку сдвиговой азимутальной анизотропии, основанной на явлении расщепления поляризованной поперечной волны [5]. Именно параметры азимутальной анизотропии, наряду с традиционными модулями упругости, необходимы для оценки упругих свойств коллекторов нефти и газа. Ниже приводятся результаты экспериментов по изучению эффектов, связанных с азимутальной анизотропией, оценкой достоверности определения коэффициента и пространственного положения плоскостей анизотропии.

Поляризованная поперечная волна в азимутально-анизотропной среде

Поляризованная поперечная волна в анизотропной среде вызывает сложное акустическое поле [4, 7, 13]. В скважине, пересекающей слоистую среду, поляризованные поперечные колебания в пределах изотропного участка распространяются с характерными скоростью и частотным спектром. Когда таких участков больше одного, то есть среда азимутально-анизотропна, поперечная волна распадается на независимые волны, распространяющиеся с собственными скоростными и частотными характеристиками. Это явление называется расщеплением поперечной волны (shear-wave splitting) [5]. Использованию этого явления для изучения свойств горных пород посвящено много работ. В акустическом каротаже оно используется с целью определения азимутальной анизотропии, вызванной слоистостью пород, механическими напряжениями, текстурой трещин и т. п. [8]. Обычно рассматриваются только два взаимно перпендикулярных направления распространения поперечной волны, условно называемых “быстрое” и “медленное” [13]. Для определения пространственного положения этих направлений используется система наблюдений (зонд), содержащая два перпендикулярно расположенных дипольных излучателя X

и Y и два набора дипольных приемников с взаимно ортогональными осями поляризации X и Y [6]. Оси поляризации одноименных излучателей и приемников находятся в одной плоскости, следовательно, в полном опросе дипольного зонда производятся два соосных измерения XX и YY и два перпендикулярных XY и YX . Первая буква обозначает положение оси излучателя, вторая – приемника. Система из четырех волновых картин позволяет синтезировать волновые картины поперечных колебаний, которые могли бы распространяться по быстрому и медленному направлениям и соответственно определить азимуты быстрой и медленной волн относительно плоскостей поляризации диполей [3, 6]. Ввиду ортогональности направлений достаточно определить только одно из них, обычно берется направление быстрой волны. Для пространственного положения этих направлений необходимо иметь измерения положения плоскостей поляризации дипольных преобразователей в скважине (в АВАК это достигается системой акселерометров).

Экспериментальное изучение поведения поляризованной поперечной волны в модели анизотропной среды

Модель анизотропной среды выполнена из стального корпуса $120 \times 120 \times 600$ мм с вмонтированной в него латунной пластиной $120 \times 20 \times 600$ мм. Пластина расположена в середине корпуса, разделяя его на две равные части. В центре модели просверлено отверстие диаметром 25 мм, в которое с одного конца вставлен дипольный излучатель, а с другого погружается дипольный приемник. Оба преобразователя центрированы в отверстии. Возбуждение излучателя импульсное. Схематично экспериментальная установка показана на рис. 1.

Акустическая среда данной модели является азимутально-анизотропной относительно отверстия, имитирующего скважину, и имеет две вертикальные плоскости симметрии, проходящие посередине стального блока и латунной пластины соответственно. Толщина стенки модели в полтора–два раза больше длины волны, поэтому окружающую отверстие среду можно считать бесконечной, а регистрируемые в первых вступлениях колебания – поперечной волной. Интервальные времена поперечной волны проверялись по справочнику [1]. Модель установлена в бак, заполненный водой. Волновые картины регистрировались цифровым осциллографом Tectronix TDS3032, дискретность оцифровки 0,2 мкс. Динамика поперечных колебаний



Рис. 1. Схематичный чертеж продольного разреза модели анизотропной среды и схемы измерений. Размер модели $120 \times 120 \times 600$ мм. Излучатель и приемник дипольные

в анизотропной среде изучалась путем изменения направления осей поляризации электроакустических преобразователей. Направление распространения колебаний определялось путем измерения интервального времени и частотного спектра при перемещении приемника вдоль оси отверстия с шагом 25 мм.

Форма акустических колебаний поляризованной поперечной волны в азимутально-анизотропной среде

Как известно [6, 12], при положении осей поляризации дипольных преобразователей в плоскости симметрии анизотропной среды, или в однородной среде, поперечная волна регистрируется только на соосных зондах, данные зондов из скрещенных диполей в идеальном случае представляют собой акустический шум. Такая ситуация весьма примитивна и поэтому на ней не стоит останавливаться. Гораздо более сложное поле колебаний наблюдается в случае отклонения оси диполя от плоскости симметрии среды, когда попе-

речная волна расщепляется. В использованной модели расщепление должно происходить по двум направлениям: по направлению, представленному сталю (интервальное время поперечной волны DTS $\approx 320 \text{ мкс/м}$), и по направлению латуни (DTS = 472 мкс/м). Указанное значение интервального времени поперечной волны для латуни взято из справочника [1]. Интервальное время поперечной волны для стали в справочнике отсутствует, поэтому оно определено измерением интервального времени при соосном положении приемника и излучателя в плоскости симметрии, проходящей через сталь. На рис. 2 представлены наборы волновых картин, зарегистрированные в модели при положении оси излучателя под углом 45° к плоскости

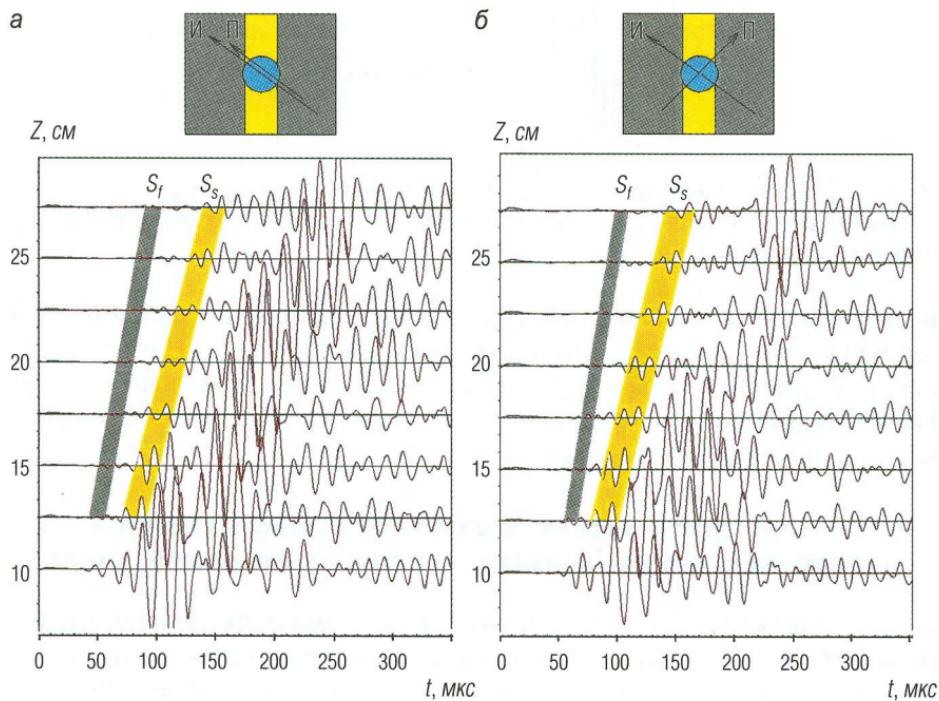


Рис. 2. Волновые картины, зарегистрированные вдоль вертикальной оси модели при положении осей дипольных излучателя и приемника в соответствии с изображением вверху рисунка. Пакет поперечной волны по стали S_f , затенен серым цветом; по латуни S_s – желтым; Z – расстояние от излучателя до приемника; t – время от момента излучения

симметрии, проходящей вдоль вертикальной оси отверстия модели, посередине латунной пластины. Ось приемника располагалась либо соосно с осью излучателя (рис. 2, а), либо перпендикулярно к последней (рис. 2, б). Положение осей излучателя (И) и приемника (П) в поперечном сечении модели показано на рисунках вверху. В обоих наборах регистрируются колебания S_f и S_s , распространяющиеся с интервальными временами, близкими к 320 и 470 мкс/м, то есть соответствующие интервальным временам поперечных волн в стали и латуни. В первой волновой картине, зарегистрированной при близком положении приемника от излучателя, пакеты волн не разделились из-за малого временного сдвига между ними. Медленная волна всегда вступает на фоне колебаний пакета быстрой волны, следовательно, подвержена интерференционным искажениям.

Пакеты волн различаются не только по значениям интервальных времен, но и по частоте и амплитуде. Поперечная волна по латуни S_s (медленная) имеет видимую частоту (около 60 кГц) в полтора раза ниже, а амплитуду в 5 раз больше, чем волна по стали S_f (быстрая).

Чтобы оценить динамику поперечных колебаний в зависимости от азимута, произведена регистрация волновых картин при постоянном положении излучателя и повороте приемника против часовой стрелки (вид сверху). На рис. 3 изображены волновые картины, зарегистрированные при повороте приемника от 0° до 315° через 45°.

Из приведенных волновых картин следует:

- 1) при положении оси приемника в плоскостях симметрии модели колебания по стали или латуни исчезают, при этом наблюдается максимальная амплитуда колебаний в оставшемся пакете, углы 45°, 225° и 135°, 315° соответственно. На этих углах искажения за счет интерференции волн минимальны;
- 2) при оси приемника, совпадающей или повернутой относительно оси излучателя на угол, кратный 90°, регистрируются оба пакета колебаний (углы 0°, 90°, 180°, 270°). При этих углах ось приемника находится под углом 45° к плоскостям симметрии модели;
- 3) особо следует отметить изменение фазы колебаний на 180° при прохождении оси поляризации приемника через плоскость азимутальной симметрии среды.

Вышеописанные эксперименты с моделью анизотропной среды полностью подтверждают результаты известных работ с моделями

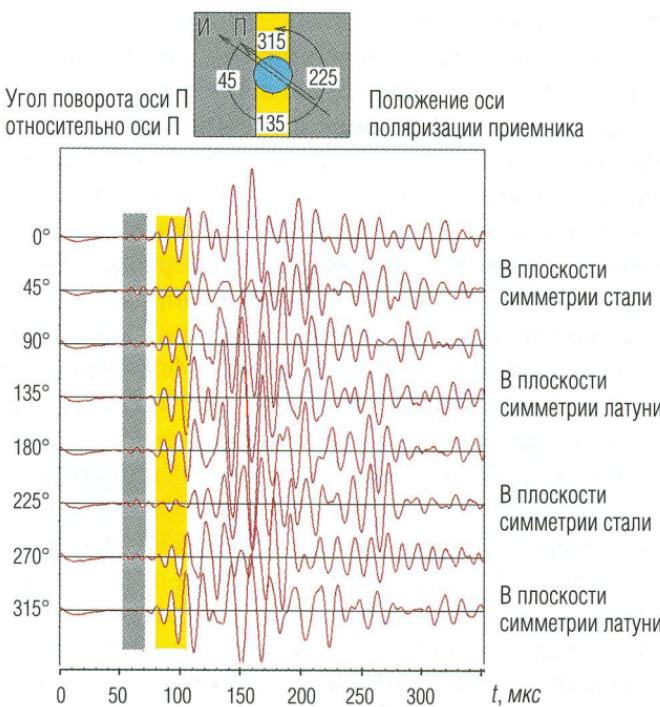


Рис. 3. Волновые картины упругих колебаний, зарегистрированных при повороте оси дипольного приемника относительно оси излучателя. При положении оси приемника в плоскости симметрии стали или латуни колебания, распространяющиеся соответственно по латуни или стали, исчезают

анизотропных сред, изготовленных из пластика [12, 13]. Цель данных экспериментов – наглядно показать явление расщепления поляризованной поперечной волны и связанные с этим явлением эффекты.

Вычисление азимута и коэффициента анизотропии

Конечной целью кроссдипольных измерений является определение интервального времени поперечной волны, а также коэффициента сдвиговой азимутальной анизотропии. Поскольку в процессе каротажа оси дипольных преобразователей могут занимать произвольное положение относительно плоскостей симметрии среды, окружающей скважину, прежде всего необходимо найти этот угол рассогласования.

Затем после поворота исходных данных на найденный угол синтезировать новые данные, по которым определить истинные значения интервальных времен и соответственно вычислить коэффициент анизотропии породы.

Существует несколько способов вычисления азимутов быстрой и медленной волн [3, 4, 10, 11]. Наиболее часто используемый способ – вращение поля, которое осуществляется путем перемножения матрицы, составленной из волновых картин, зарегистрированных в процессе каротажа, на матрицу единичного вектора вращения. Этот способ по имени автора называется вращением Алфорда (Alford) [2]. Критерии определения угла поворота могут быть различными. В целом, как следует из приведенных выше экспериментов, в качестве критериев могут использоваться различия в динамических, кинематических, спектральных параметрах волн или их сочетание. Например, в [6] предлагается находить угол поворота по минимуму энергии сигналов зондов с перпендикулярным положением преобразователей (XY и YX) и соответствующих максимуме и минимуме времени распространения волны на соосных зондах (XY и YY). Отношение динамических параметров соосных и перпендикулярных измерений в спектральном представлении предлагается в [3]. В работе [10] описан способ, основанный на анализе подобия форм колебаний быстрой и медленной волн и различия в их времени вступления, причем их скорости предполагаются постоянными в пределах приемной антенны. Это обстоятельство позволяет произвести накопление сигналов с заданными временными задержками и получить параметры анизотропии.

Обработка данных дипольных зондов АВАК, реализованная в пакете программ LogPWin, основана на алгоритме определения интервальных времен волн в синтетических волновых картинах. Волновые картины синтезируются, и интервальные времена определяются на каждом шаге поворота поля с дискретностью 5° от 0° до 180° . Интервальные времена определяются во временных окнах, задаваемых кинематическими параметрами, полученными при обработке данных соосных зондов XX и YY . Искомый угол находится при установлении максимальной разницы интервальных времен при двух углах поворота, отличающихся на $90^\circ \pm 20^\circ$. Меньшее (DTS8) из интервальных времен относится к быстрой волне, большее (DTS9) – к медленной. Угол,

соответствующий минимальному интервальному времени (MROT), является основным и используется при дальнейших расчетах угла анизотропии ANGA. Чтобы избежать случайных ошибок при определении угла поворота поля, угол относится к середине интервала значений интервальных времен, отличающихся в пределах заданной погрешности. Процедура вычислений по данному алгоритму весьма быстрая и позволяет одновременно определить угол и интервальные времена быстрой и медленной волн.

Имея наборы волновых картин, полученных в вышеописанной модели, легко проверить эффективность различных алгоритмов обработки данных дипольных зондов в контролируемых условиях. По четырем волновым картинам (двум соосным и двум перпендикулярным) измерений на двух точках глубины, отстоящих друг от друга на 50 мм, был сформирован Lis-файл, подобный получаемому при каротаже. Оси дипольных преобразователей расположены под углом 45° к плоскостям симметрии модели и повернуты против часовой стрелки. Волновые картины WF7, WF8 при соосном расположении излучателя и приемников приведены на рис. 4, а. После обработки данных получены синтетические волновые картины быстрой WF15, WF16 (рис. 4, б) и медленной WF17, WF18 (рис. 4, в) волн. Вращение поля производилось методом Алфорда, в качестве критерия угла поворота использовался минимум интервального времени быстрой волны или максимум амплитуды медленной волны. При использовании в качестве критерия динамических параметров получен угол 40°, по интервальному времени – угол 37,5°. В обоих случаях получено значение угла в пределах погрешности (двух шагов с дискретностью 5°) и соответственно сформированы подобные синтетические волновые картины. Значения интервальных времен (быстрой волны – 319,2 мкс/м, медленной – 470,9 мкс/м) не выходят за пределы погрешности измерения. На первый взгляд кажется, что использование динамических параметров даже предпочтительнее. Однако надо иметь в виду, что такая величина коэффициента анизотропии (0,18), как в модели, встречается весьма редко, чаще она находится в пределах 0,1, поэтому быстрая и медленная волны незначительно различаются по спектру колебаний и амплитуде. В независимости от коэффициента анизотропии и погрешностей измерений, связанных со скважинными условиями, интервальные времена волн являются более надежными

параметрами, поэтому в программе обработки данных АВАК именно интервальные времена использованы в качестве критерия при определении угла поворота поля дипольных колебаний относительно плоскостей поляризации преобразователей зонда.

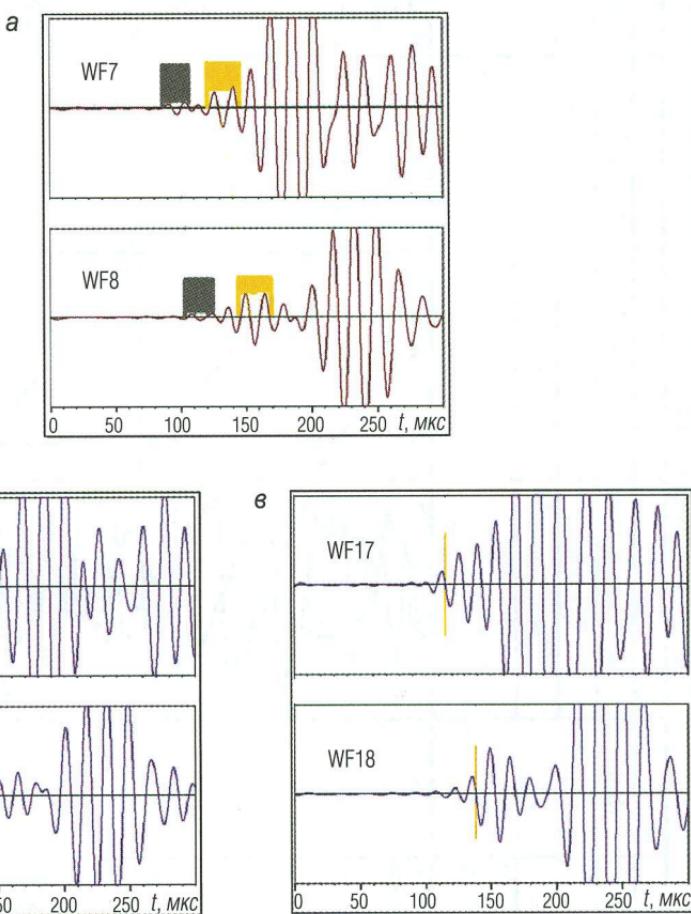


Рис. 4. Пример разложения данных дипольного зонда на быструю и медленную поперечные волны в контролируемых условиях лабораторной модели:
а – исходные волновые картины по направлению XX, отстоящему на 45° от плоскости симметрии модели; б – волновые картины быстрой волны; в – волновые картины медленной волны. Серым цветом обозначены колебания, распространяющиеся по стали, желтым – по латуни. Измерительная база – 50 мм

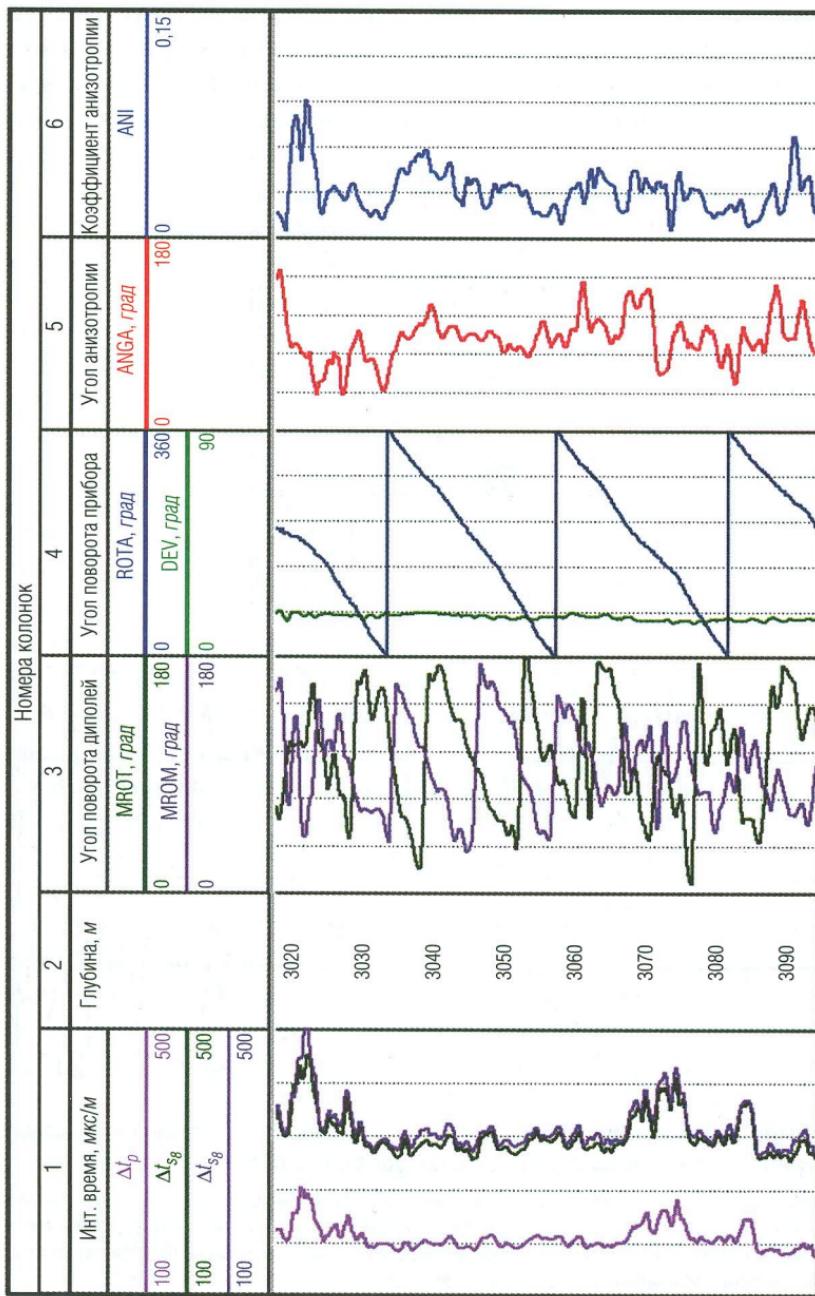


Рис. 5. Вычисление угла анизотропии ANGА и коэффициента анизотропии ANI в наклонной скважине при вращении прибора ROTA. Значение угла анизотропии ANGА не зависит от пространственного положения плоскостей поляризации преобразователей зонда относительно плоскостей MROT и MROM

В качестве доказательства можно рассмотреть пример обработки данных АВАК в реальной нефтяной скважине (рис. 5). Скважина имеет наклон около 15° (DEVI, колонка 4), прибор интенсивно вращался вокруг своей оси во время записи данных (ROTA, колонка 4), примерно один оборот на 20 м каротажа. Тем не менее угол анизотропии ANGA (колонка 5) – угол между вертикальной плоскостью и плоскостью поляризации быстрой волны – не подвержен значительным отклонениям от среднего значения 90° и по конфигурации подобен кривой коэффициента анизотропии ANI (колонка 6). Углы между плоскостями поляризации быстрой MROT и медленной MROM волн и плоскостью дипольного зонда XX приведены в колонке 3. В колонке 1 находятся кривые интервальных времен продольной волны DTP, быстрой поперечной DTS8 и медленной поперечной DTS9. Колонка глубин – 2. Стабильное значение угла анизотропии ANGA при интенсивном вращении прибора доказывает надежность его определения и достоверность полученных значений интервальных времен поляризованных поперечных волн.

Заключение

1. Форма колебаний, регистрируемых дипольными зондами в азимутально-анизотропной среде, в значительной степени зависит от положения осей поляризации электроакустических преобразователей относительно плоскостей симметрии анизотропной среды.
2. В общем случае волновые картины дипольных зондов представляют собой интерференцию поперечных колебаний, распространяющихся от излучателя к приемнику с различными скоростями и частотными спектрами.
3. Процедура вращения поля акустических колебаний, зарегистрированных системой дипольных зондов, позволяет разделить поперечные волны, определить их интервальные времена и положение плоскостей поляризации относительно осей электроакустических преобразователей.
4. Алгоритмы обработки данных аппаратуры АВАК с большой вероятностью позволяют достоверно определить такие параметры анизотропной среды в скважине, как коэффициент сдвиговой анизотропии ANI и угол между вертикальной плоскостью и плоскостью поляризации быстрой волны ANGA.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Михайлова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. *Alford R. M.* Shear Data in the Presence of Azimuthal Anisotropy: Dilley, Texas. Presented at 56-th SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1986. P. 476–479.
3. *Hatchell P. J., Cowles C. S.* Flexural Borehole Modes and Measurement of Shear-Wave Azimuthal Anisotropy. Presented at 62-nd SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1992. P. 201–204.
4. *Cheng N., Cheng C. H.* Decomposition and Particale Motion of Acoustic Dipole Log in Anisotropic Formation. Presented at 65-th SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1995. P. 1–4.
5. *Crampin S.* Evaluation of Anisotropy by Shear-Wave Splitting // Geophysics. 1985. V. 50. № 1. P. 142–152.
6. *Esmersoy C., Koster K., Williams M., Kane M.* Dipole Shear Anisotropy Logging. Presented at 64-th SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1994. P. 1139–1142.
7. *Leslie H. D., Randall C. J.* Multipole Sources in Boreholes Penetrating Anisotropic Formations: Numerical and Experimental Results. JASA, 1992. V. 91. № 1. P. 12–27.
8. *Mueller M. C., Boyd J., Esmersoy C.* Case Studies of the Dipole Shear Anisotropy Log. Presented at 64-th SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1994. P. 1143–1146.
9. *Sinha B. K., Norris A. N., Chang S.-K.* Borehole Flexural Modes in Anisotropic Formations. Presented at 62-nd SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1992. P. 855–858.
10. *Tang X. M., Cheng A.* Quantitative Borehole Acoustic Methods. Elsevier, 2004. 255 p.
11. *Tao G., Zhu Z., Cheng C. H.* An Investigation on Azimuthal Anisotropy Measurements with Ultrasonic Dipole Data. Presented at 65-th SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1995. P. 85–88.
12. *Zhu Z., Cheng C. H., Toksoz M. N.* Propagation of Flaxural Waves in an Azimuthaly Anizotropic Borehole Model. Presented at 63-nd SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1993. P. 68–72.
13. *Zhu Z., Cheng C. H., Toksoz M. N.* Polarization and Particle Motion of the Flexural Waves in an Anizotropic Borehole Model. Presented at 65-th SEG annual meeting, Expanded Abstracts, 1995. P. 89–92.