



УДК 535.012.2:550.832: 550.832.44:622.7.016.33

## Оценка анизотропии пласта по данным мультипольного акустического каротажа

### Anisotropy Estimation for Multipole Sonic Logs



Н.Ю. Чистяков



С.В. Белов

**Н.Ю. Чистяков**

ChistyakovNYu@fxc-png.ru

Тел./факс +7 (342) 241-43-72

/ООО Предприятие «ФХС-ПНГ», г. Пермь/

**С.В. Белов, к.т.н.**

Belov@fxc-png.ru

Тел./факс +7 (342) 241-43-72

/Пермский государственный национальный  
исследовательский университет,  
ООО Предприятие «ФХС-ПНГ», г. Пермь/

N.Yu. Chistyakov /FXC-PNG LLC, Perm/

S.V. Belov, PhD /Perm State University

FXC-PNG LLC, Perm/

Описаны возможности программного комплекса «Соната» для обработки и интерпретации данных мультипольного акустического каротажа, включая оценку азимутальной анизотропии. Показаны дальнейшие направления развития обработки в области скважинных акустических исследований для определения 3D-анизотропии околоскважинного пространства.

**Ключевые слова:** кросс-дипольный каротаж, азимутальная анизотропия, радиальная неоднородность, дисперсионный анализ, изгибаемая волна, вращение Алфорда.

*The features of the Sonata software package for processing and interpretation multipole acoustic logging data, including azimuthal anisotropy, are described. Further directions for the development of processing in the area of borehole sonic logging to determine the 3-D anisotropy of the near-wellbore space are shown.*

**Key words:** cross-dipole logging, azimuthal anisotropy, radial heterogeneity, dispersive analysis, flexure wave, Alford rotation.

Современные акустические исследования могут быть использованы для решения широкого спектра геофизических задач. Одним из направлений является изучение анизотропии упругих свойств горных пород. На первых этапах развития акустического каротажа (АК) предлагалась модель однородной изотропной среды, которую можно описать двумя упругими модулями, например модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Для расчета этих модулей достаточно измерить скорости продольной и поперечной волны.

В настоящее время большое внимание уделяется трудноизвлекаемым запасам в коллекторах,

которые, как правило, являются низкопористыми и малопроницаемыми. С целью повышения добычи углеводородов из таких коллекторов их подвергают специальным воздействиям, для чего требуются надежные знания о физических свойствах этих коллекторов. В силу особенностей внутреннего строения нетрадиционных коллекторов их физические свойства часто бывают анизотропными. Простейший случай анизотропии (поперечная или трансверсальная изотропия) имеет только одно четкое направление (вертикальное – VTI-среда или горизонтальное – HTI-среда), в то время как другие два направления эквивалентны друг другу. Более

сложный вариант – анизотропия с орторомбической симметрией. Эта модель среды более точно описывает анизотропную породу с вертикальной трещиноватостью.

Слабоанизотропные породы в случае трансверсально изотропной среды можно описать тремя параметрами Томсона: анизотропия Р-волны  $\varepsilon$ , анизотропия S-волны  $\gamma$  и параметр  $\delta$ . Параметры могут быть определены по измерениям скорости продольных волн в трех ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) направлениях и скорости поперечных волн в двух ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) направлениях.

$$\varepsilon = \frac{V_p(90) - V_p(0)}{V_p(0)};$$

$$\gamma = \frac{V_{SH}(90) - V_{SH}(0)}{V_{SH}(0)};$$

$$\delta = 4[V_p(45)/V_p(0) - 1] - [V_p(90)/V_p(0) - 1].$$

Акустический каротаж развивается в направлении увеличения типов регистрируемых волн, точности оценки их кинематических и динамических параметров. Для реализации возможностей акустического каротажа разработаны и применяются сложные приборы, которые возбуждают и регистрируют в скважине различные типы волн, – приборы мультипольного акустического каротажа. Новые приборы могут регистрировать сигнал в разных направлениях с помощью секторных датчиков.

Все современные приборы АК не измеряют параметры волн, а регистрируют волновое поле. Выделение целевых волн и получение их параметров выполняется в программном обеспечении. Предприятие «ФХС-ПНГ» разработало программный комплекс «Соната» [1], который реализует сквозную технологию обработки данных мультипольного АК от ввода и оценки качества исходного материала, обработки данных до формирования заключения по результатам обработки.

Реализованная в программе «Соната» технология обработки данных мультипольного АК включает следующие ключевые возможности.

■ Открытый ствол, изучение свойств горных пород:

- предварительная обработка данных АК, получение кинематических, динамических и спектральных параметров волн;
  - кросс-диполь – оценка анизотропии;
  - акустическая профилометрия;
  - кавернометрия;
  - скважинный акустический телевизор.

■ Оценка технического состояния:

- акустическая цементометрия (АКЦ), секторная АКЦ;
- гамма-гамма-цементометрия и толщинометрия (СГДТ);
- магнитно-импульсная дефектоскопия обсадной колоны;
- многорычажная профилометрия;

- акустическая профилометрия;
- скважинный акустический телевизор (расчет радиусов, диаметров).

Обработка данных возможна для различных типов приборов мультипольного АК. Поддерживается загрузка данных из файлов различных геофизических форматов, в том числе популярных международных стандартов. Оценка качества включает анализ глубин замера, характеристик волновых картин, угла вращения прибора. Предварительная обработка включает увязку и возможность объединения нескольких замеров по глубине. В случае некорректной записи угла поворота прибора возможен пересчет по данным акселерометров с учетом ранее проведенной калибровки или автоматической калибровки по скважинным данным. Предварительная обработка сигнала включает такие операции, как демультимплексирование сигнала, восстановление исходных амплитуд сигнала при регистрации с блоком автоматического контроля усиления, коррекция ограничений амплитуд, усиление/ослабление сигнала, частотная фильтрация с настройкой различных типов фильтра и др. Выделение пакетов волн и определение кинематических параметров включает расчет фазовых скоростей волн и оценку скоростей волн методом когерентности. Интервальные времена волн для многоэлементных приборов в отличие от обычного метода STC рассчитываются с высоким разрешением на базе приемников. Для учета неоднородностей ствола скважины возможно применение специальных процедур коррекции при расчете интервального времени.

Обработка данных кросс-дипольной секции прибора предназначена для определения направления и величины анизотропии по параметрам быстрой и медленной изгибных волн ( $F$ -волн), которые, в свою очередь, получают с помощью расщепления исходных кросс-дипольных компонент с помощью вращения Алфорда. На **рис. 1** показан пример обработки данных кросс-дипольного каротажа.

Ключевой особенностью обработки кросс-дипольных данных в программе «Соната» является применение инверсной методики, которая, в отличие от стандартных подходов, включает в себя одновременную оценку анизотропии и определение направления и неопределенности направления быстрой  $F$ -волны, а также методику глобальной минимизации для реконструкции скорости  $F$ -волны. Данный подход позволяет получать более устойчивое решение для определения направления поляризации быстрой  $F$ -волны в условиях слабой анизотропии.

Многие программы обработки кросс-дипольного АК предлагают только автоматический расчет параметров изгибных волн, в то время как сама обработка используется как «черный ящик» и результаты обработки не могут быть откорректированы. В отличие от такого подхода, в программном комплексе «Соната» обработка может производиться как в полностью автоматическом

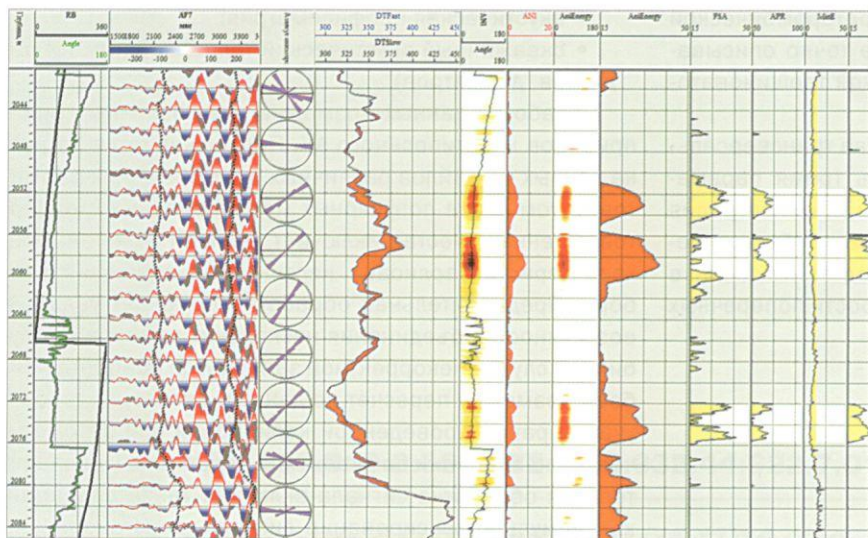


Рис. 1. Пример обработки данных кросс-дипольного каротажа в ПО «Соната»

режиме, когда задается набор входных параметров, а на выходе получаются данные, включающие все необходимые результаты обработки, так и в интерактивном режиме, когда промежуточные результаты обработки могут быть получены другими способами под контролем интерпретатора. Например, процедуры независимого построения волновых картин быстрой и медленной  $F$ -волн и расчета величины анизотропии по их интервальным временам позволяют получать карту анизотропии как по инверсной методике, так и после прослеживания  $F$ -волны отдельно по каналам быстрой и медленной волны. Возможность простого интерактивного изменения направления быстрой и медленной  $F$ -волн, особенно в интервалах слабой анизотропии, позволяет легко исправлять ошибочную обработку и получать адекватное представление результатов.

Величина анизотропии может быть определена как относительно времени прихода быстрой и медленной  $F$ -волн в соответствующий приемник, так и относительно скоростей волн, рассчитанных на основании данных о расстановке приемников. Поскольку расстояние между приемниками в несколько раз меньше расстояния от источника до приемника, улучшается решающая способность по глубине.

В программе «Соната» реализована возможность независимого расчета анизотропии в обоих вариантах, что позволяет, с одной стороны, выделять более мелкие аномалии, с другой стороны, снижать восприимчивость к шуму и резким изменениям (например, границы пласта) и реагировать на более масштабные характеристики, в том числе на анизотропию горизонтальных напряжений горных пород. Кроме обычной величины анизотропии, определяемой по соотношению скоростей быстрой и медленной  $F$ -волн, можно рассчитать анизотропию энергии и построить азимутальную развертку этой величины. Под анизотропией энергии понимается оценка совокупности различий быстрой и медленной  $F$ -волн как по динамическим, так и по кинематическим характеристикам. Анизотропия энергии, хотя и представляет собой качественную оценку и зависит от методов обработки, вместе с тем является основным показателем анизотропии.

Большое значение при обработке кросс-дипольного АК имеет достоверность получаемых результатов, особенно когда эти результаты рассчитываются автоматически по предлагаемой методике [2]. На достоверность и качество результатов могут влиять множество факторов, таких как идентичность дипольных

источников и приемников, геометрическое положение прибора в скважине, отношение сигнал/помеха, качество регистрируемых волновых картин, частота излучателей и др. Стандартными индикаторами качества обработки являются минимальная и максимальная относительные энергии кросс-компонент. Известно, что в случае анизотропии, когда направление диполей совпадает с направлением анизотропии или ортогонально ему, энергия кросс-компонент стремится к нулю. Дисперсия энергии кросс-компонент показывает зоны существенной анизотропии. Используемая инверсная методика глобальной минимизации для реконструкции скорости  $F$ -волны позволяет получить дополнительные важные индикаторы качества. В первую очередь это – оценка неопределенности между направлениями быстрой и медленной  $F$ -волн. Данный критерий особенно важен в условиях слабой анизотропии, когда разделить направления только по скоростям волн представляется затруднительным. Другим важным критерием качества обработки является показатель, характеризующий соответствие преимущественно анизотропной или изотропной модели среды в некотором интервале глубин. По комплексу рассчитываемых параметров – индикаторов качества обработки можно выделить доверительные интервалы анизотропии, в которых результаты обработки данных кросс-дипольного АК можно считать достаточно достоверными при выдаче заключения о наличии анизотропных интервалов.

Полученные в результате обработки данных АК скорости продольной и поперечных волн используются для определения физико-механических свойств пород, в том числе в различных азимутальных направлениях. В программе «Соната» возможны обработка и сопоставление результатов нескольких замеров АК, что позволяет эффективно решать задачи по мониторингу гидроразрыва пласта (ГРП) при условии записи

до и после ГРП. При незначительном увеличении анизотропии эффект от проведенного ГРП можно оценить по вспомогательным параметрам – изменению анизотропии энергии и скорости быстрой  $F$ -волны.

Качественное и наглядное представление результатов играет важную роль при обработке и интерпретации геофизических данных. Кроме представления результатов обработки в виде кривых и азимутальных разверток анизотропии, возможно построение диаграммы Шмидта («розы») анизотропии, полярных диаграмм и гистограмм распределения анизотропии. Дополнительно возможна генерация настраиваемого текстового заключения в MS Office, включая поинтервальные характеристики, процентную статистику, местоположение различных выделенных элементов скважины. Достоверность применяемых алгоритмов расчета была подтверждена как сравнительной обработкой в зарубежных программных пакетах (рис. 2), так и сопоставлением с результатами исследований скважинным акустическим телевизором и микроимиджером.

Актуальной проблемой является определение причины анизотропии, т.е. чем она вызвана – собственной анизотропией породы или стрессом. Эффективным ин-

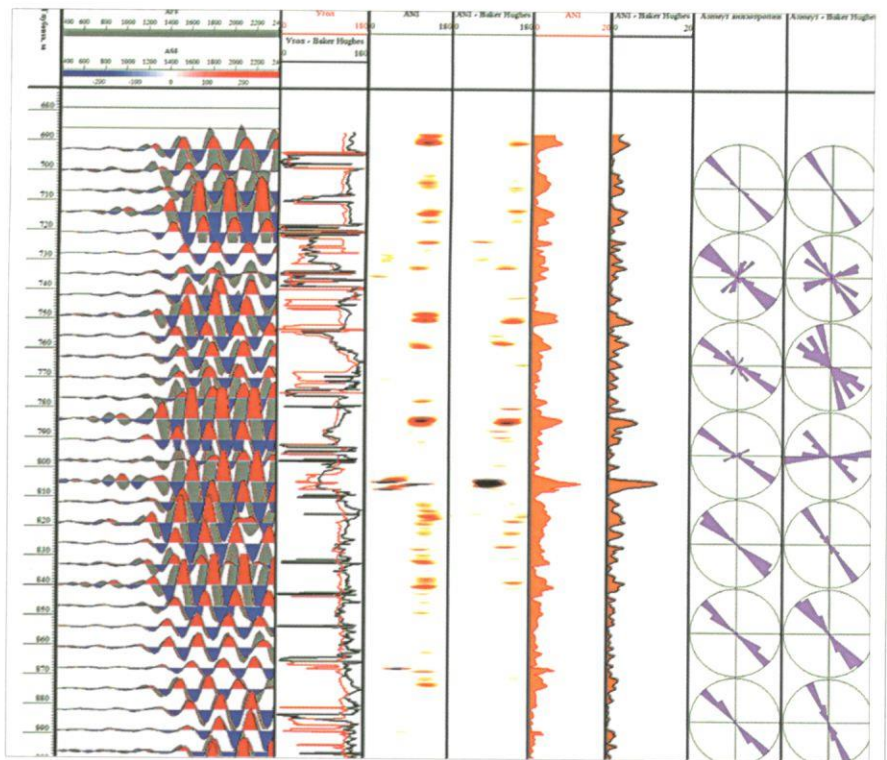


Рис. 2. Сравнение результатов обработки XMAC в ПО «Соната» и зарубежном ПО

струментом такой оценки является дисперсионный анализ быстрой и медленной  $F$ -волн [3]. Еще одним из вариантов применения дисперсионного анализа волн может быть оценка качества получаемых интервальных времен быстрой и медленной  $F$ -волн, введение поправки за дисперсию при ее наличии, оценка радиальной неоднородности. Максимальный эффект дис-

персионный анализ дает в случае широкого спектра возбуждаемого дипольного сигнала.

На рис. 3 показан пример расчета дисперсионных кривых по данным прибора XMAC после ГРП. В низкоскоростном интервале трещина не сформировалась. В интервале коллектора появилась радиальная неоднородность – скорость вблизи стенки скважины понизилась

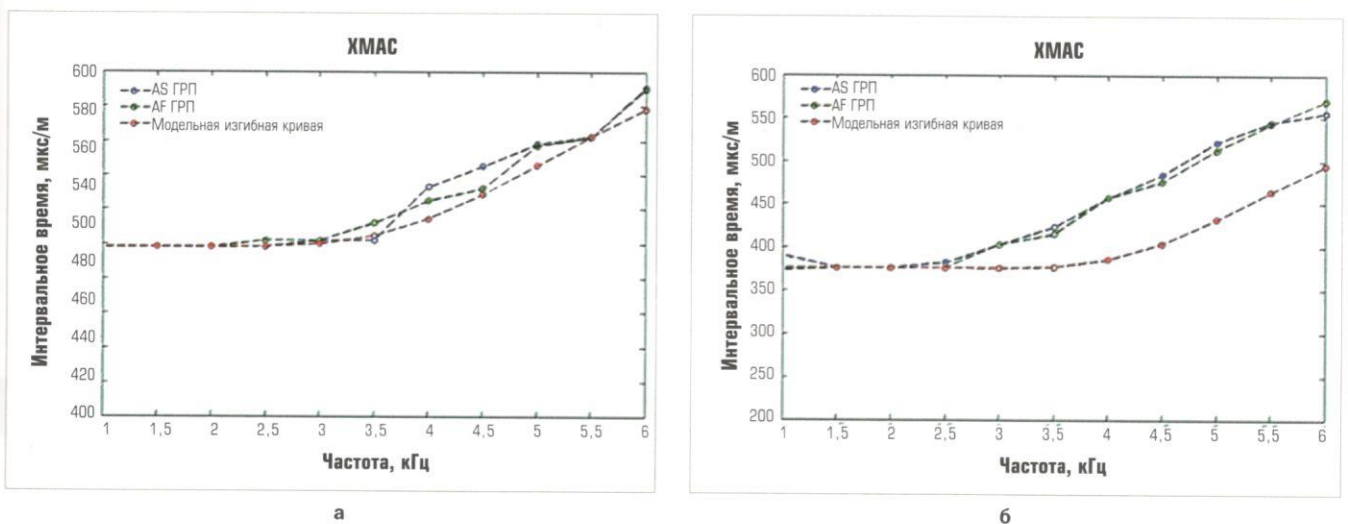
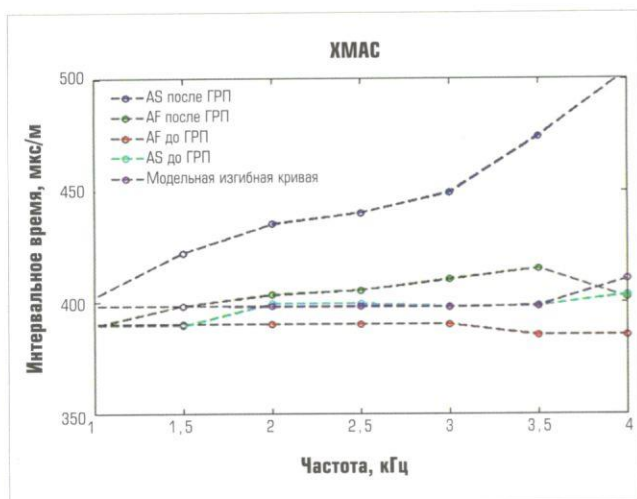


Рис. 3. Однородная изотропная среда (а) и неоднородная изотропная среда (б). Красными пунктирными линиями показана кривая модельной  $F$ -волны, зелеными – быстрой  $F$ -волны, синими – медленной  $F$ -волны



**Рис. 4.** Однородная слабоанизотропная среда до ГРП становится неоднородной анизотропной после ГРП. Фиолетовой пунктирной линией показана кривая модельной F-волны, красной линией – быстрой F-волны до ГРП, бирюзовой линией – медленной F-волны до ГРП, зеленой линией – быстрой F-волны после ГРП, синей линией – медленной F-волны после ГРП

без появления анизотропии, что выразилось в увеличении интервального времени на высоких частотах.

На рис. 4 показан пример расчета дисперсионных кривых по данным прибора ХМАС до и после ГРП. До ГРП среда была однородной со слабо выраженной анизотропией. После ГРП анизотропия увеличилась до 8–20 %. Наблюдается увеличение анизотропии и уменьшение скорости быстрой F-волны на высоких частотах, что указывает на радиальную неоднородность, связанную с увеличением густоты трещин вблизи стенки скважины.

Радиальную неоднородность околоскважинного пространства также можно оценить по изменениям интервального времени продольной и изгибающей волн на разных расстояниях от источника. В случае положительного градиента можно построить радиальный профиль скорости волн. Оценка радиального профиля скорости позволяет понять, вызваны ли изменения упругих свойств пород процессом бурения или горизонтальным напряжением, а также перейти к количественной оценке горизонтальных напряжений.

Для использования данного метода необходимо формирование длинной расстановки приемников за счет двух источников колебаний, удаленных на разное расстояние.

Для достоверной оценки параметров анизотропии необходимо метрологическое обеспечение и его стандартизация. К сожалению, стоит отметить слабую метрологическую обеспеченность мультипольного АК, а также практическое отсутствие метрологических стандартов в этой области. Например, при обработке кросс-дипольного АК важными характеристиками являются идентичность дипольных преобразователей, соответствие спектральных характеристик сигналов. Поэтому необходимо постоянное метрологическое сопровождение таких приборов, анализ амплитуд и спектральных характеристик дипольных излучателей и приемников. Если источники или приемники не откалиброваны по амплитуде, то вычисление волновых картин по азимуту с помощью вращения Алфорда будет некорректным. Тем не менее в процессе обработки можно учесть калибровочные характеристики источников и приемников для получения достаточно хорошего результата.

Получение достоверных параметров акустических волн в наклонно направленных и горизонтальных скважинах представляет особые трудности из-за высокой вероятности децентрации прибора. Для минимизации этого влияния необходимо использование приборов АК с секторными приемниками, регистрирующими сигналы в разных азимутальных направлениях с последующей отдельной обработкой по каждому азимуту. Это значительно снижает степень влияния децентрации прибора, а также формы ствола скважины. Аналогично и для кросс-дипольных приемников отдельная регистрация сигналов для противоположных дипольных приемников позволит провести оценку качества получаемого результирующего сигнала, а также коррекцию амплитуд в случае неидентичности.

Так как скорость волны Стоунли зависит от скорости поперечной SH-волны, а при монопольном и дипольном каротаже изучается SV-волна, то по соотношению скоростей этих волн можно оценить вертикально-горизонтальную анизотропию (параметр Томпсона  $\gamma$ ). По данным мультипольного каротажа можно оценивать азимутальную, вертикальную анизотропию и радиальную неоднородность.

В программном комплексе «Соната» уже реализованы основные процедуры для обработки данных мультипольного АК и оценки азимутальной анизотропии. В настоящее время ведется разработка нового модуля для выполнения дисперсионного анализа волн, оценки радиальной неоднородности и проницаемости пласта, поддержки метрологического обеспечения мультипольного акустического каротажа.

#### Литература

1. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс «Соната-2019» (Модульная система обработки и интерпретации данных геофизических исследований скважин) № 2019610488 от 11.01.2019. Белов С.В., Ташкинов И.В., Шумилов А.В. // Москва, РОСПАТЕНТ.
2. Белов С.В., Ташкинов И.В., Шумилов А.В. Обработка данных

кросс-дипольного акустического каротажа в программном комплексе «Соната» // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд. АИС, 2014. – Вып. 10 (244). – С. 114–126.

3. Чистяков Н.Ю., Белов С.В. Применение дисперсионного анализа при кросс-дипольном акустическом каротаже для оценки свойств горных пород // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд. АИС, 2018. – Вып. 10 (292). – С. 68–77.