

УДК 550.834.015

Н. А. Смирнов
ООО "Нефтегазгеофизика"

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Рассмотрен пример реализации прибора волнового акустического каротажа для скважин малого диаметра (78–103 мм). Испытания опытного образца показали, что качественные измерения этим типом прибора могут выполняться также и в скважинах диаметром 240 мм. Дополнительные возможности метода реализуются на пути комплексирования различных модификаций акустических исследований. В частности, рассмотрены возможности комплекса волнового каротажа и высокочастотного акустического сканирования при решении задачи выделения интервалов трещинных коллекторов.

Ключевые слова: волновой акустический каротаж, скважинный прибор малого диаметра, трещинный коллектор нефти.

Введение

Бурное развитие цифровых технологий в 70–80-е годы XX века позволило значительно поднять уровень техники для исследований скважин. Изменения, прежде всего, коснулись роста числа измерительных каналов в аппаратуре и автоматизации процесса обработки регистрируемых данных. Переход на бурение горизонтальных скважин поставил задачу проведения геофизических измерений бескабельными приборами, которые доставляются в скважину на колонне бурильных труб. Естественно, без современных электронных компонентов (процессоров, энергонезависимой памяти) создание автономных и LWD систем было бы невозможно.

В акустическом каротаже вышеизложенные перемены дали возможность регистрировать большие объемы данных, что привело к созданию сканеров, приборов с многоэлементными зондами и автономных приборов различного назначения. Технические средства измерения позволили проводить производственные исследования, ранее практически не реализуемые в России даже на уровне опытных работ. Эти исследования включают в себя волновой акустический каротаж с применением многополюсных преобразователей для пря-

мых измерений параметров поперечной волны [2]; высокочастотное акустическое сканирование для оценки технического состояния обсадки скважины, включая определение дефектов цементного камня [3]; исследования горизонтальных скважин автономными приборами, включая методы волнового акустического каротажа и профилеметрии [5]. Все перечисленные виды акустических исследований успешно реализованы в ООО "Нефтегазгеофизика" (ООО "НГГ").

Некоторые особенности акустических технологий ООО "НГГ" и решаемые геологические задачи

Следует отметить, что предлагаемые акустические технологии не являются прямыми копиями западных аналогов, а созданы на основе мирового опыта и приспособлены к местным условиям. Различия обусловлены существенной разницей в организации работ в российских и западных компаниях. Если западные фирмы являются и производителями, и пользователями геофизической техники, по крайней мере на начальном этапе освоения, выполняя весь комплекс работ от проектирования до сдачи скважины в эксплуатацию, то в России этот цикл, как правило, разделен между экономически независимыми фирмами. Таким образом, разработчик передает (продает) технику другой фирме для производственной эксплуатации. Часто эта фирма не имеет персонала, способного в достаточной степени освоить все возможности новой технологии. Данная особенность отечественного рынка накладывает следующие требования на новые разработки:

- 1) аппаратура и ее программное обеспечение должны быть достаточно простыми для освоения персоналом, не имеющим специальной подготовки в этом виде геофизических исследований. Это означает формализацию операций при регистрации, обработке данных и выдаче заключения;
- 2) скважинные приборы не должны иметь сложную конструкцию и требовать многочисленных настроек. Желательно, чтобы скважинные приборы имели не слишком большие габариты;
- 3) представление результатов измерений должно быть простым и наглядным.

Исходя из приведенных требований, был разработан акустический комплекс для исследования бурящихся и эксплуатационных скважин, в который вошли следующие виды аппаратуры [7]:

- приборы для измерения интервальных времен продольной и по-перечной (высокоскоростной разрез) волн и оценки качества цементирования вертикальных скважин по стандартным методикам. Приборы с компенсированным зондом 4АК;
- аппаратура волнового акустического каротажа с использованием дипольных зондов наряду с монопольными низкочастотными зондами (АВАК). Эта аппаратура предназначена для исследований низкоскоростных разрезов и пород со сложной структурой порового пространства, определения наличия и направления акустической анизотропии;
- акустические сканеры для оценки состояния обсадной колонны и равномерности заполнения затрубного пространства цементом. Аппаратура АСТ;
- автономные приборы стандартного и волнового акустического каротажа для исследования горизонтальных скважин. Приборы АКГ и АВАК-А;
- автономные акустические профилемеры для измерения геометрии ствола горизонтальной скважины. Приборы АСПГ.

Перечисленные виды акустических устройств позволили обеспечить российские геофизические предприятия технологии для основных видов исследований скважин и конкурировать с западными фирмами, а в ряде случаев оказывать услуги последним. При исследованиях решаются важные задачи по определению акустических свойств горных пород и контролю технического состояния скважин. Эти задачи включают:

- определение модулей упругости горных пород;
- оценку коллекторских свойств низкопористых пород;
- уточнение литологии и анизотропии пород;
- контроль гидроразрывов пластов, то есть наличие и направление трещины гидроразрыва;
- измерение геометрии ствола горизонтальной скважины и выбор места установки герметизирующего пакера;
- оценку технического состояния обсадной колонны (толщины стенки и наличия дефектов) и цементного камня, включая определение наличия вертикальных каналов в цементном камне.

Все виды исследований обеспечены не только техническими средствами, но и программами обработки данных и расчета геологических параметров. Программные средства базируются на строгом

соблюдении основных принципов теории методов и на передовых современных методиках. Аппаратура из вышеуказанного комплекса хорошо известна на российском рынке и широко используется практически всеми сервисными компаниями России, поэтому остановимся только на относительно новых видах исследований.

Ниже приведены описание новой разработки аппаратуры волнового АК и пример решения одной из最难нейших задач нефтепромысловой геофизики – выделение зоны трещиноватости, повышающей проницаемость карбонатных пород.

Аппаратура волнового акустического каротажа для скважин малого диаметра

Сокращение за последнее время разведочного бурения вызвало потребность в малогабаритной аппаратуре, что обусловлено доразведкой старых нефтяных месторождений из фонда эксплуатационных скважин, обсаженных стальными трубами диаметром 147–168 мм. Естественно, новое бурение осуществляется меньшими диаметрами, как правило, 78–103 мм. Для исследования таких скважин возникла потребность в приборах малого диаметра. Если стандартная аппаратура АК диаметром 43 и 60 мм для целей акустической цементометрии и измерения параметров головных волн выпускается давно, то при создании аппаратуры волнового АК возникали определенные трудности. Эти трудности связаны, прежде всего, с созданием низкочастотных электроакустических преобразователей с малыми габаритами. Дело в том, что при малой площади излучающей поверхности происходит дополнительное снижение мощности излучения. В то же время физические основы метода не позволяют значительно увеличить частоту излучения, чтобы компенсировать снижение амплитуд. Согласно теоретическим расчетам [4, 6] длина поперечной волны при прямом ее возбуждении (как в дипольных системах) должна быть больше диаметра скважины. Таким образом, амплитуды возбуждаемых волн значительно уменьшаются по сравнению с имеющимися место при стандартных габаритах скважинного прибора, то есть, диаметре 90 мм и более. Снижение амплитуды колебаний ведет к уменьшению отношения сигнал/шум и, следовательно, к снижению качества первичных данных ВАК. Решение данной проблемы находится в компромиссе между чувствительностью электроакустических преобразователей и

конструктивными особенностями скважинного прибора. В связи с тем что прибор данного вида предназначен для работы в хвостовиках, то есть скважинах малого диаметра и на достаточно больших глубинах, можно увеличить частоту дипольных излучателей до 5–6 кГц.

Также весьма проблематично обеспечить низкочастотное монопольное излучение при малой излучающей поверхности преобразователя. Низкочастотный излучатель, используемый в стандартном приборе АВАК-11 для возбуждения трубной волны, можно заменить на более высокочастотный излучатель и, если создать достаточно широкополосное излучение, использовать известные алгоритмы разделения волн при обработке данных, чтобы оценивать параметры волны Стоунли. Следуя вышеизложенным принципам, после ряда экспериментов и нескольких макетных образцов удалось получить вполне пригодный для производственной эксплуатации образец скважинного прибора. На рис. 1 показан пример записи данных малогабаритного прибора с дипольными преобразователями АВАК-60 в контрольно поверочной скважине ПФ “Центргазгеофизика”. В первой колонке находятся интервальные времена продольной, поперечной и Стоунли волн. Во второй – коэффициент Пуассона. Колонки 3–6 содержат фазокорреляционные диаграммы (ФКД) монопольного зонда 20 кГц, монопольного зонда 7 кГц, дипольных зондов XX и YY. В последней колонке находится кривая диаметра скважины и линия, показывающая последний номинальный диаметр $D_{\text{ном}}$. На ФКД линии, соответствующие волнам, обозначены: P – продольная волна; S – поперечная волна; St – волна Стоунли; $F1$ – изгибная волна. Диаметр скважины изменяется от 216 до 245 мм, как следует из кривой CALU (в последней колонке), полученной акустическим сканером. На глубине 934 м имеется узкая глубокая каверна диаметром более 400 мм. Значения акустических параметров (особенно интервального времени поперечной волны ΔT_S) в этой каверне недостоверны, поэтому ΔT_S и NU заменены кодом отсутствия. В остальной части интервала исследования получены качественные данные и вычислены достоверные значения параметров волн. Коэффициент Пуассона находится в диапазоне 0,28–0,35, то есть значений, характерных для данного известково-глинистого разреза. Сравнения с ранее выполненными измерениями АВАК-11 полностью совпадают. Полученные результаты испытаний малогабаритной аппаратуры волнового АК дают уверенность в возможностях ее широкого применения в геофизическом производстве.

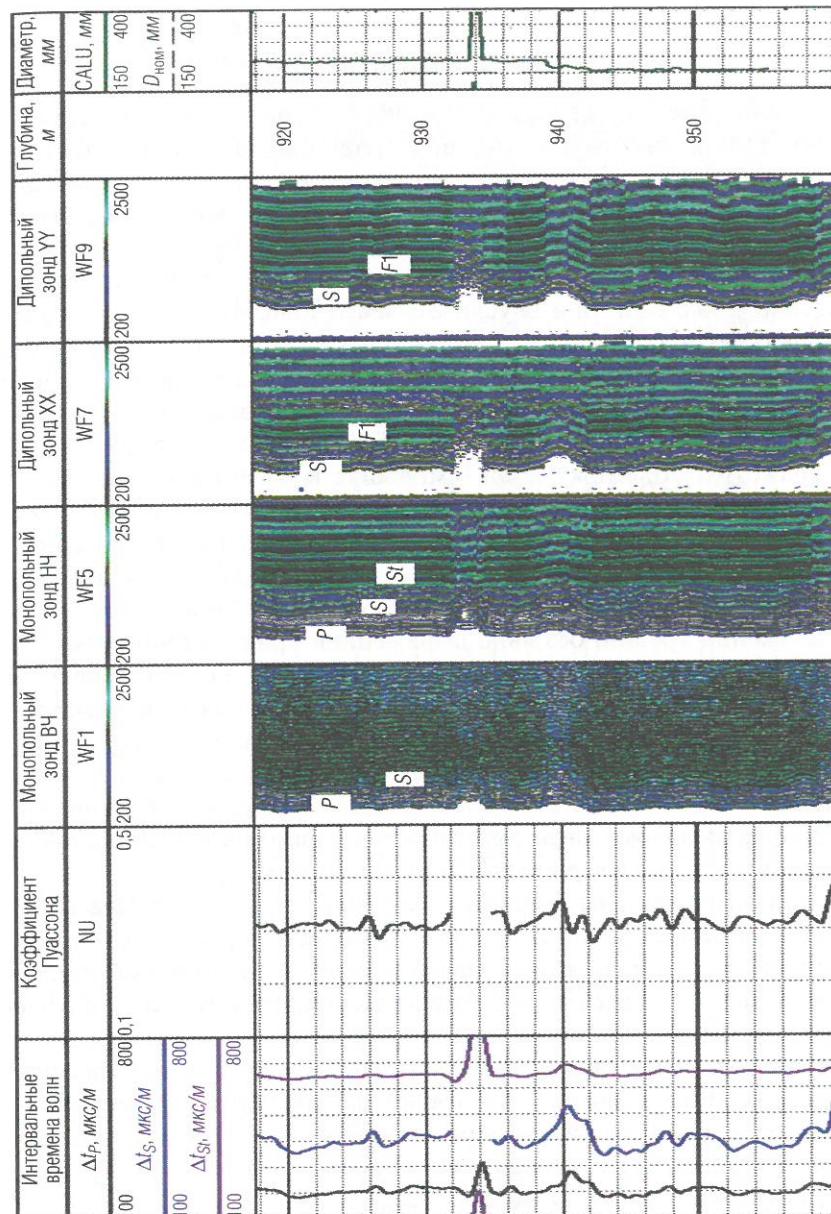


Рис. 1. Волновой акустический каротаж малогабаритной аппаратурой АВАК-60

Определение интервала пород, содержащих проницаемые трещины

С давних времен [1] на акустический метод возлагается задача оценки трещинных коллекторов. С этой целью использовались различные параметры волн: динамические параметры поперечной волны, коэффициент анизотропии и др. Акустическое телевидение, фиксируя дефекты на стенке скважины, также входит в общий комплекс методов оценки трещиноватости. Только наличие дефектов на стенке, даже если они обусловлены трещинами, не гарантирует повышенную проницаемость, так как трещины могут быть техногенными. Не всякие трещины представляют интерес, а лишь те, которые способны повысить гидропроводность стенки скважины. Соответственно, трещины в акустическом поле должны оказывать влияние на параметры объемных волн, уменьшая коэффициент Пуассона при одновременном повышении сжимаемости, выходить на стенку скважины и иметь раскрытость, то есть отражаться на изображениях сканера. Что касается сдвиговой анизотропии, то она не обязательно имеет повышенное значение в трещинных породах. При равномерном расположении трещин без явно выраженной ориентации они могут не оказываться на азимутальном разделении скорости поперечной волны. Именно сочетание аномально низкого значения коэффициента Пуассона и наличия неоднородности на стенке скважины служит, пожалуй, самым надежным критерием выделения интервала трещиноватых пород. На рис. 2 показан пример нахождения интервалов трещиноватых доломитов по акустическим параметрам. Факт наличия трещиноватости подтверждается описанием керна.

Интервалы выделены на основе поведения коэффициента Пуассона: падения ниже значения 0,22 – предельного для карбонатных пород при одновременном снижении значения модуля объемного сжатия по отношению к его значению во вмещающих породах. В общем случае понижение модуля объемного сжатия (повышение сжимаемости породы) сопровождается увеличением значения коэффициента Пуассона. На изображении стенки скважины явно наблюдаются дефекты. Разумеется, отдельные трещины могут иметь место и на других участках представленного интервала, однако только в выделенных интервалах значения коэффициента Пуассона ниже 0,2.

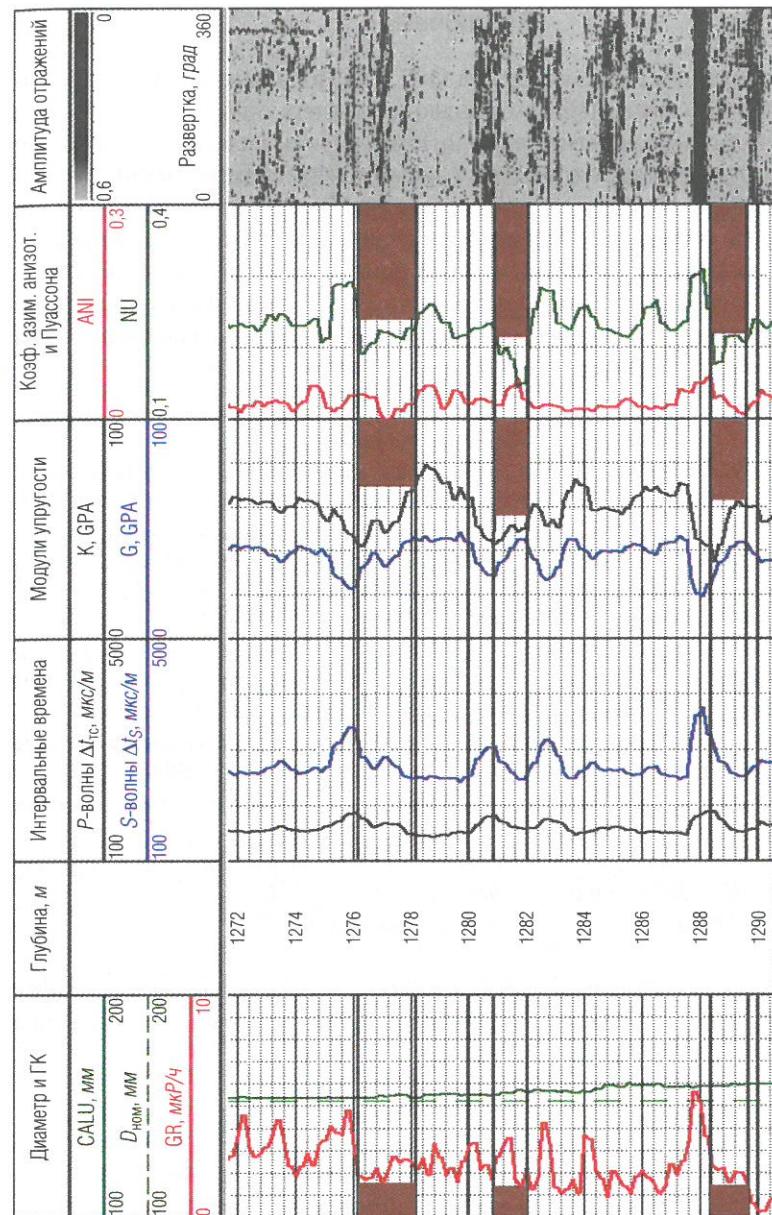


Рис. 2. Нахождение интервалов трещиноватых пород (признаки: уменьшение коэффициента Пуассона NU, увеличение сжимаемости (уменьшение модуля объемного сжатия K) и акустический образ стеки скважины (крайняя правая колонка); интервалы показаны коричневым цветом

Заключение

Отдел акустического каротажа ООО “Нефтегазгеофизика” проводит работы по обеспечению производственных организаций России современными надежными технологиями акустических исследований скважин. Эти работы охватывают весь спектр возможных применений: термобарические условия и диаметры бурения. Один из главных приоритетов – повышение точности и надежности определения геологических параметров. Эти задачи решаются путем комплексирования различных методов. Одним из комплексов является сочетание волнового акустического каротажа и высокочастотного сканирования (акустического телевидения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю. И. Акустический каротаж как возможный метод исследований трещиноватости горных пород // Труды ВНИГРИ. 1962. Вып. 193. С. 118–131.
2. Смирнов Н. А. и др. Акустический каротаж с использованием монопольных и дипольных преобразователей: регистрируемые волны, решаемые задачи и полученные результаты // Сборник тезисов международной геофизической конференции и выставки ЕАГО, EAGE, SEG. М., 1997.
3. Смирнов Н. А., Варыхалов А. С., Пивоварова Н. Е. Определение технического состояния обсадки скважины методом акустического сканирования // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 4 (226). С. 40–52.
4. Kurkjian A. L. Radiation from a Low Frequency Horizontal Acoustic Point Force in a Fluid-filled Borehole. SEG 54th Ann. International Meeting, 1984. P. 5–7.
5. Smirnov N. A., Varykhakov A. S. Determination of Horizontal Borehole Geometry by Ultrasonic Pulse-echo Method. SPE 117430, 2008.
6. Winbow G. A., Rice J. A. Theoretical Performance of Multipole Sonic Logging Tools. SEG 54th Ann. International Meeting, 1984. P. 37–40.
7. www.karotazh.ru. Сайт ООО “Нефтегазгеофизика”.

*Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО “Нефтегазгеофизика” и рекомендована к публикации*

УДК 550.85

Н. Г. Козыряцкий
ООО “Нефтегазгеофизика”

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ АБСОЛЮТНОЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ КЕРНА

Рассматриваются результаты внедрения и эксплуатации стандартных образцов абсолютной газопроницаемости, изготовленных на основе металлических порошков и спеченного порошка корунда, для метрологического обеспечения петрофизических исследований фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-коллекторов.

Ключевые слова: петрофизика, метрология, абсолютная газопроницаемость, металлические порошки, спеченный корунд, стандартные образцы.

Одним из основных средств достижения необходимой точности и достоверности результатов измерений при петрофизических исследованиях (ПФИ) является высокий научно-технический уровень метрологического обеспечения (МО) средств и технологий измерений, используемых при ПФИ, в связи с чем МО ПФИ должно быть неотъемлемым элементом всей технологической цепи изучения горных пород, начиная от отбора и привязки кернового материала и заканчивая его хранением.

При этом соблюдение требований обеспечения единства и достоверности измерений при ПФИ достигается, в том числе, наличием системы эталонов, образцовых средств измерений, предназначенных для воспроизведения, хранения и передачи единиц измеряемых при ПФИ физических величин или определяемых параметров образцов горных пород и флюидов, их насыщающих.

Сказанное в полной мере относится и к такому достаточно масштабному виду ПФИ, как измерение абсолютной газопроницаемости керна (в дальнейшем по тексту – проницаемости).

Как и любой измерительный процесс, измерения проницаемости обязательно должны сопровождаться оценкой их погрешности. Если подобная оценка не проведена или выполнена не на соответствующем уровне, информация, полученная при измерении проницаемости,