

- тельного анализа причин, которые, возможно, и не связаны с качеством заключений по данным С/О-каротажа.
3. Для анализа несовпадений необходимо проведение дополнительных геофизических исследований по определению параметров работы пластов. Результаты геофизических работ и анализ геологической и промысловой ситуации позволяют выявить объективную причину несовпадений и наметить пути совершенствования технологии оценки текущего насыщения пластов методом углерод-кислородного каротажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проведению импульсного спектрометрического нейтронного гамма-каротажа аппаратурой серии АИМС и обработке результатов измерений при оценке текущей нефтенасыщенности пород (терригенные отложения) МИ 41-17-1399-04 / В. А. Велижанин, В. С. Бортасевич, Д. Р. Лобода, Т. Е. Меженская, С. Н. Саранцев, Р. Т. Хаматдинов, В. Г. Черменский, Н. К. Глебочева, В. М. Теленков.

УДК 550.832.44

*Н. А. Смирнов, Н. Е. Пивоварова, А. С. Варыхалов,
В. А. Пантиухин, В. А. Велижанин*
ООО "Нефтегазгеофизика"

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ЗАТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Показана высокая эффективность определения качества затрубной изоляции при комплексировании акустических цементомера, толщиномера, микросканера и СГДТ.

Введение

Оценка качества герметизации затрубного пространства нефтегазовых скважин является важнейшей задачей промысловой геофизики. Объемы работ по решению этой задачи растут год от года. Вме-

сте с тем комплекс методов и их методическое обеспечение в отечественном производстве практически не развивается с начала восьмидесятых годов, хотя в мировой практике произошли существенные сдвиги в направлении применения микроакустических методов [1, 2]. Методические руководство [3] по использованию комплекса АКЦ–СГДТ–акустический сканер носит характер пожеланий, так как анализ результатов измерений не formalизован и применение этой методики предполагает наличие субъективного анализа.

Основным методом в геофизическом производстве остается традиционная акустическая цементометрия (АКЦ), причем часто в устаревшей модификации (начала 60-х годов), строящейся на измерениях амплитуды волн по колонне двухэлементным зондом. Оценка степени контакта цементного камня с колонной производится на основе измерений коэффициента затухания волны по колонне трехэлементным зондом (УЗБА, АК-В). Даже не обращая внимания на точность и отсутствие критериев оценки достоверности принцип таких измерений не позволяет выйти на определение количественных параметров, связанных с состоянием цементного камня. Поскольку динамические параметры волны по колонне при интегральных измерениях зависят не только от акустических свойств среды, по которой волна распространяется, но и от чисто технических причин, разделение эффектов требует привлечения дополнительных независимых измерений другими методами и совершенствования техники самого метода АКЦ. Простейшим примером технического эффекта является уменьшение амплитуды сигнала, передаваемого от аналогового прибора (УЗБА, АК-В) на поверхность, в зависимости от емкости геофизического кабеля, которая изменяется при вытяжке последнего под действием собственного веса. Таким образом, чем глубже находится интервал исследования, тем меньше амплитуда сигнала. Применение методики измерений коэффициента затухания волны по колонне в фиксированном временном окне устраняет вышеизложенный недостаток, но не защищает от ошибок, связанных с неидентичностью электроакустических преобразователей и децентрализацией прибора в скважине.

Значительно лучше с точки зрения точности измерений дело обстоит при применении приборов с компенсированными зондами, однако оценки индекса цементирования (VI) требуют знания граничных значений коэффициента затухания для конкретных цементных смесей, а также интервалов залегания гель- и портландцемента. Кро-

ме того, из-за эквивалентности эффектов от различных дефектов цементного камня зачастую невозможно определить тип дефекта и соответственно сделать заключение о герметичности затрубного пространства.

Прогресс в решении задачи оценки герметичности крепления обсадной колонны связан с комплексированием метода АКЦ и других методов, позволяющих определить плотность цемента и степень его однородности в комплексе с АКЦ. К таким методам относятся гамма-гамма-дефектометрия (СГДТ), а также микроакустические измерения на преломленных (измерения коэффициентов затухания в секторах скважины) и отраженных (акустическое сканирование) волнах. Комплекс методов, в котором производятся формализованный анализ данных каждого из методов и взаимный учет оценок, позволяет повысить достоверность и формализовать заключение о герметичности затрубного пространства.

Оценка герметичности обсадки скважины на основе данных АКЦ и СГДТ

Параметры, получаемые прибором СГДТ (СГДТ-НВ), – плотности цементного камня в шести секторах, качество цементирования, эксцентриситет и толщина колонны, – могут быть использованы при формализованной оценке качества цементирования по данным АК и выдаче совместного заключения о качестве цементирования.

При расчете индекса цементирования BIG по данным АК используется формула:

$$BIG = (BATC - ALN_1) / (ALX_{1(2)} - ALN_1),$$

где ALN_1 – значение коэффициента затухания в свободной колонне, задаваемое в таблице параметров обработки; ALX_1 и ALX_2 – значения коэффициента затухания при плотном контакте портландцемента и гельцемента соответственно. Выбор типа цемента осуществляется по данным СГДТ.

При оценке плотности контакта цемент–колонна используется система неравенств, принятая в методике АКЦ:

- $0,8 = BIG$ – плотный контакт;
- $0,08 = BIG < 0,8$ – частичный контакт;
- $BIG < 0,08$ – отсутствие контакта.

В совместном заключении выдается пять градаций состояния цементного камня по критериям, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки состояния цементного камня

Тип контакта по АКЦ	Заполнение по СГДТ	Заключение АК+СГДТ
Отсутствие	Нет цемента Канал в гельцементе Неоднородный портландцемент Неоднородный гельцемент	Свободная колонна
Отсутствие	Гельцемент Портландцемент Канал в портландцементе	Круговой зазор
Частичный	Нет цемента	Свободная колонна
Частичный	Канал в портландцементе Канал в гельцементе	Канал в цементе
Частичный	Гельцемент Портландцемент Неоднородный портландцемент Неоднородный гельцемент	Кавернозный цемент
Плотный	Канал в гельцементе Неоднородный гельцемент	Кавернозный цемент
Плотный	Гельцемент Портландцемент Неоднородный портландцемент (смесь портланд- и гельцемента)	Плотный цемент

Пример обработки показан на рис. 1. В первой колонке изображены индекс цементирования и плотность цемента, во второй – толщина H_k и эксцентриситет колонны, в третьей – фазокорреляционная диаграмма, в четвертой – продольный разрез скважины. Три последние колонки показывают качество цементирования по данным АКЦ из расчета заполнения затрубного пространства портландцементом, качество цементирования по данным СГДТ и заключение о состоянии цементного камня на основе совместного анализа. В колонках качества цементирования произведено усреднение путем исключения интервалов мощностью менее 2 м. Следует обратить внимание, что

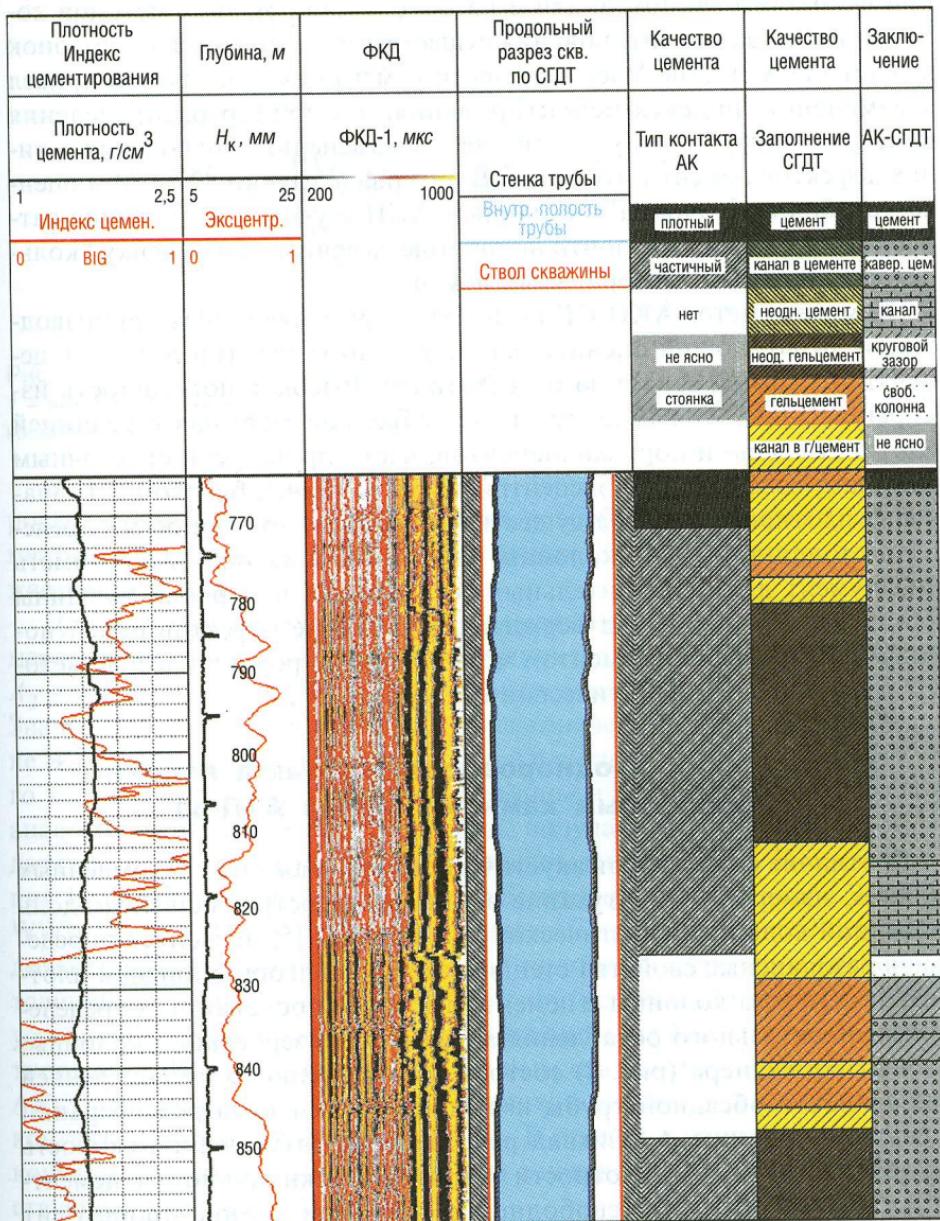


Рис. 1. Планшет результатов совместной интерпретации данных АКЦ и СГДТ

при формализованном анализе на основе данных двух методов колонка качества цементирования существенно отличается от колонок каждого из методов. Учет плотности цемента автоматически привел к изменению индекса цементирования, а характер распределения цемента в затрубном пространстве – к изменению заключения о типах дефектов цементного камня. В интервале глубин 827–850 м оценка “свободная колонна” по данным АКЦ с учетом заполнения затрубного пространства почти полностью заменилась на оценку “кольцевой зазор” или “кавернозный цемент”

Комплекс метод АКЦ-СГДТ, широко применявшийся в производстве и позволяющий оценить, как показано выше, тип дефектов цементного камня, зачастую недостаточен. Высокая погрешность измерения плотности вещества в затрубье, соизмеримая с разницей плотности гель- и портландцементов, часто приводит к ошибочным выводам, особенно при эксцентричности колонны, близком к 1. Значение плотности цемента существенно зависит от точности определения толщины стенки колонны, поэтому весьма желательно иметь инструмент для дополнительных независимых измерений толщины вдоль образующей и подтверждающих наличие дефектов цементного камня. Таким инструментом могут быть микроакустические методы и, в частности, акустический сканер.

Определение неоднородности контакта колонны с цементным камнем. Сканер АТП-80

В отличие от приборов акустического каротажа на преломленных волнах, измеряющих затухание волн, распространяющейся вдоль обсадной колонны, акустический сканер АТП [5] позволяет определить резонансные свойства стенки колонны. Алгоритм оценки плотности контакта колонны с цементным камнем основан на определении относительного ослабления амплитуды реверберации колонны.

Сигнал сканера (рис. 2) состоит из отраженного от внутренней поверхности обсадной трубы импульса A_1 и сигнала реверберации обсадной колонны A_2 . Сигнал реверберации затухающий, скорость затухания зависит от плотности контакта стенки колонны с цементным камнем. В случае свободной колонны затухание происходит медленно, декремент затухания не более 3 дБ и амплитуда реверберации максимальна. При плотном контакте цементного камня или по-

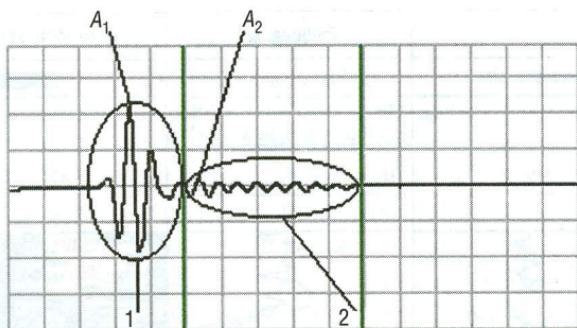


Рис. 2. Осциллограмма сигнала сканера:

1 – импульс, отраженный от внутренней стенки скважины; 2 – сигнал реверберации колонны

роды с колонной скорость затухания реверберации высокая, декремент затухания может достигать значения 20 дБ, амплитуда же снижается до уровня шумов.

Для оценки плотности контакта цементного камня с колонной измеряется отношение максимальной амплитуды сигнала реверберации A_2 к максимальной амплитуде первого отражения A_1 : $W_T = A_2/A_1$. Значение W_T , масштабированное по его значению в свободной колонне W_0 , $W_N = W_T/W_0$, является функцией плотности контакта цементного камня с колонной и толщины колонны и по физическому смыслу аналогично индексу цементирования, получаемому по данным стандартной цементометрии методом преломленных волн. Нормализация W_N позволяет получить индекс цементирования сканера WWN: $WWN = (2,5 - W_N)/1,2$. На рис. 3 приведен пример определения типа дефекта цементного камня. В первой колонке изображены значения толщины стенки колонны (THAV) и ее внутреннего диаметра (CALU), усредненные по восьми датчикам. В колонке глубин – индекс цементирования BI, рассчитанный по данным стандартного цементометра АК-73, и усредненное по восьми датчикам значение W_N – плотность контакта цемента с колонной WWM. В правой колонке – плотность контакта в форме развертки колонны с цветной кодировкой, соответствующей значениям WWN.

В целом кривые BI и WWM совпадают. Большая изрезанность кривой WWM объясняется узкой направленностью преобразователей

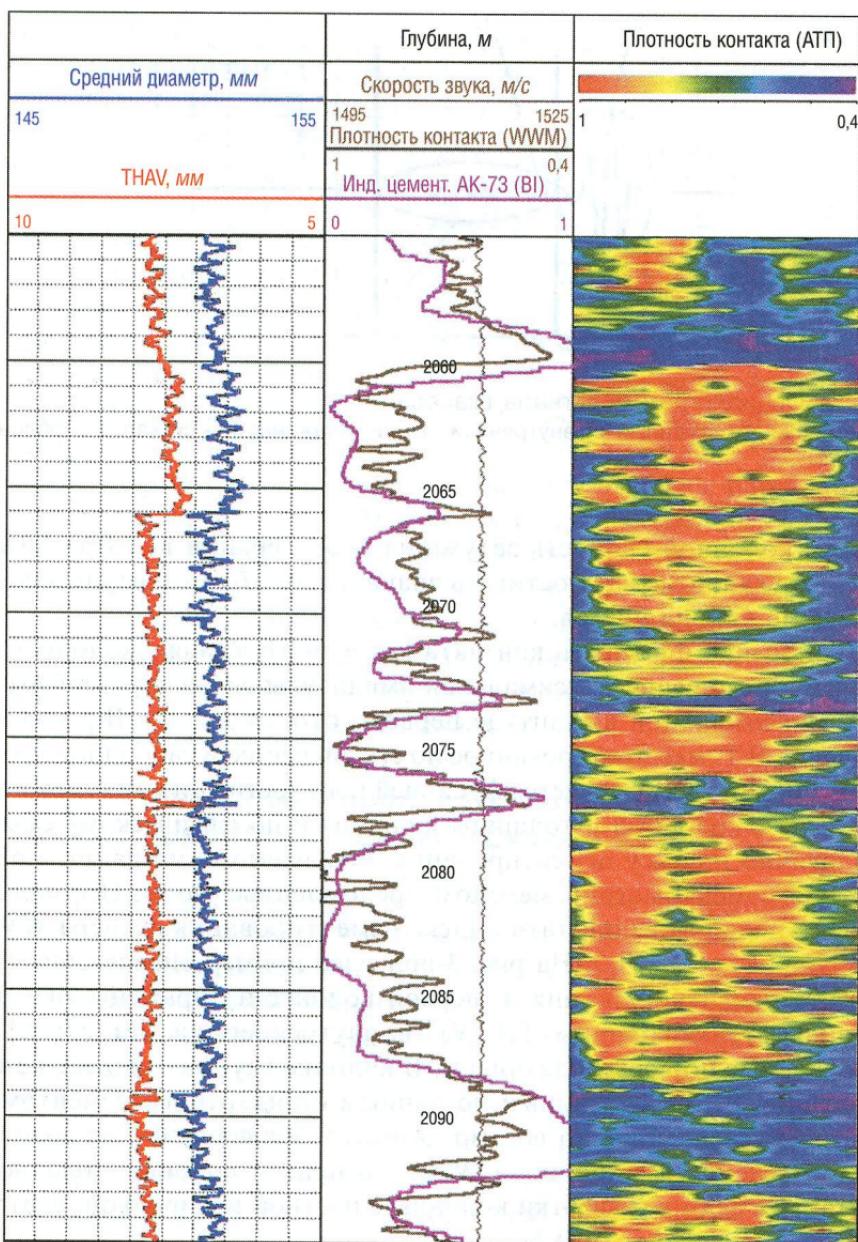


Рис. 3. Определение дефектов цементного камня по данным стандартного акустического цементомера и акустического сканера

прибора АТП и, соответственно, большей по сравнению со стандартной цементометрией разрешающей способностью. Параметры, измеренные АТП, в данном примере позволяют уточнить типы дефектов цементного камня, а именно: в интервале глубин 2078–2088 м имеется вертикальный канал. В интервале же 2088–2093 м плотность контакта по всему периметру колонны не вызывает сомнения. Разумеется, не всегда результаты измерений настолько обнадеживающие. Данный метод имеет серьезные ограничения в условиях наличия парафина на стенке трубы, неоднородности промывочной жидкости и других мешающих факторов.

Более устойчивым к помехам, хотя имеющим меньшую разрешающую способность по периметру колонны, является микроакустический цементомер с секционированными приемниками.

Оценка типа дефекта цементного камня. Цементомер с секционированными приемниками МАЦ

Цементомер с секционированными приемниками МАЦ – прибор акустического каротажа с коротким секционированным измерительным зондом, предназначенный для определения характера дефектов цементного кольца (кольцевые зазоры, продольные каналы, каверны), которые в заключениях стандартной акустической цементометрии (АКЦ) даются в одной градации как *частичный контакт цементного камня с колонной*. Измерительный зонд МАЦ содержит компенсированный зонд, включающий в себя два цилиндрических излучателя (основная частота излучения 20 кГц) и два набора приемников по четыре приемника в каждом наборе, установленных в одном поперечном сечении и сдвинутых на 90° друг относительно друга. Таким образом, в файле регистрации содержатся сигналы волн по обсадной колонне, распространяющиеся от излучателя в четырех секторах, соответствующих положениям приемников. Основными измеряемыми параметрами являются коэффициенты затухания волны по колонне BAT_i ($i = 1, 4$). Кроме того, вычисляется средний коэффициент затухания волны по колонне по суммированным волновым картинам BAT_5 , аналогичный параметру α_k стандартного цементомера типа УЗБА.

При оценке качества цементирования использована методика, основанная на линейной зависимости коэффициента затухания волны по колонне от площади соприкосновения цемента с колонной [4].

С учетом наличия BAT_i ($i = 1,4$) дополнительных параметров BAT_i введено пять градаций контакта цементного камня с колонной: 1 – свободная колонна; 2 – плотный контакт; 3 – кавернозный цементный камень; 4 – наличие вертикальных каналов в цементном камне; 5 – наличие кольцевого зазора между колонной и цементным камнем небольшой толщины. Тип дефекта цементного камня определяется по соотношениям измеренных значений коэффициентов затухания между собой и априорно заданных: коэффициента затухания волны по свободной колонне BAT_0 и при плотном контакте BAT_m . Критерии оценки приняты следующие:

- свободная колонна, если $BAT_5 \leq 2 BAT_0$;
- плотный контакт, если $BAT_5 \geq 0,8 BAT_m$ и все коэффициенты в секторах больше BAT_m ;
- кавернозный цемент, если $2BAT_0 < BAT_5$ и среднее отклонение коэффициентов затухания в четырех секторах от BAT_5 более 5;
- вертикальный канал, если $2BAT_0 < BAT_5$ и не менее двух коэффициентов затухания в секторах имеют значения больше $0,8 BAT_m$;
- кольцевой зазор, если $2BAT_0 < BAT_5$ и среднее отклонение коэффициентов затухания в четырех секторах от BAT_5 менее 5.

В качестве примера на рис. 4 приведен планшет результатов формализованного анализа. Первая колонка содержит текущие глубины, вторая – значения измеренных параметров: четыре коэффициента затухания волны по колонне, измеренные в четырех секторах $BAT_1 - BAT_4$ и коэффициент затухания волны по колонне, определенный по сумме сигналов четырех секторов BAT_5 . Третья – сопоставление коэффициентов затухания, измеренного МАЦ (BAT_5) и стандартным прибором АК с центрально расположенным одноэлементными приемниками BAT_9 . Четвертая – колонку цементирования, построенную по параметрам прибора МАЦ в соответствии с вышеупомянутыми критериями оценки состояния цементного камня. Пятая (объемная модель/МАЦ) – цветное изображение состояния контакта колонны с цементным камнем по образующей, плотность контакта пропорциональна изменению светового спектра. Шестая – колонку цементирования по данным АК. Сопоставление коэффициентов затухания волны по колонне BAT_5 и BAT_9 позволяет сделать вывод о достоверности измерений МАЦ, поскольку значения его параметра, вычисленного по сумме сигналов четырех секторов с точностью до погрешности измерений, совпадают с аналогичным параметром стандартного

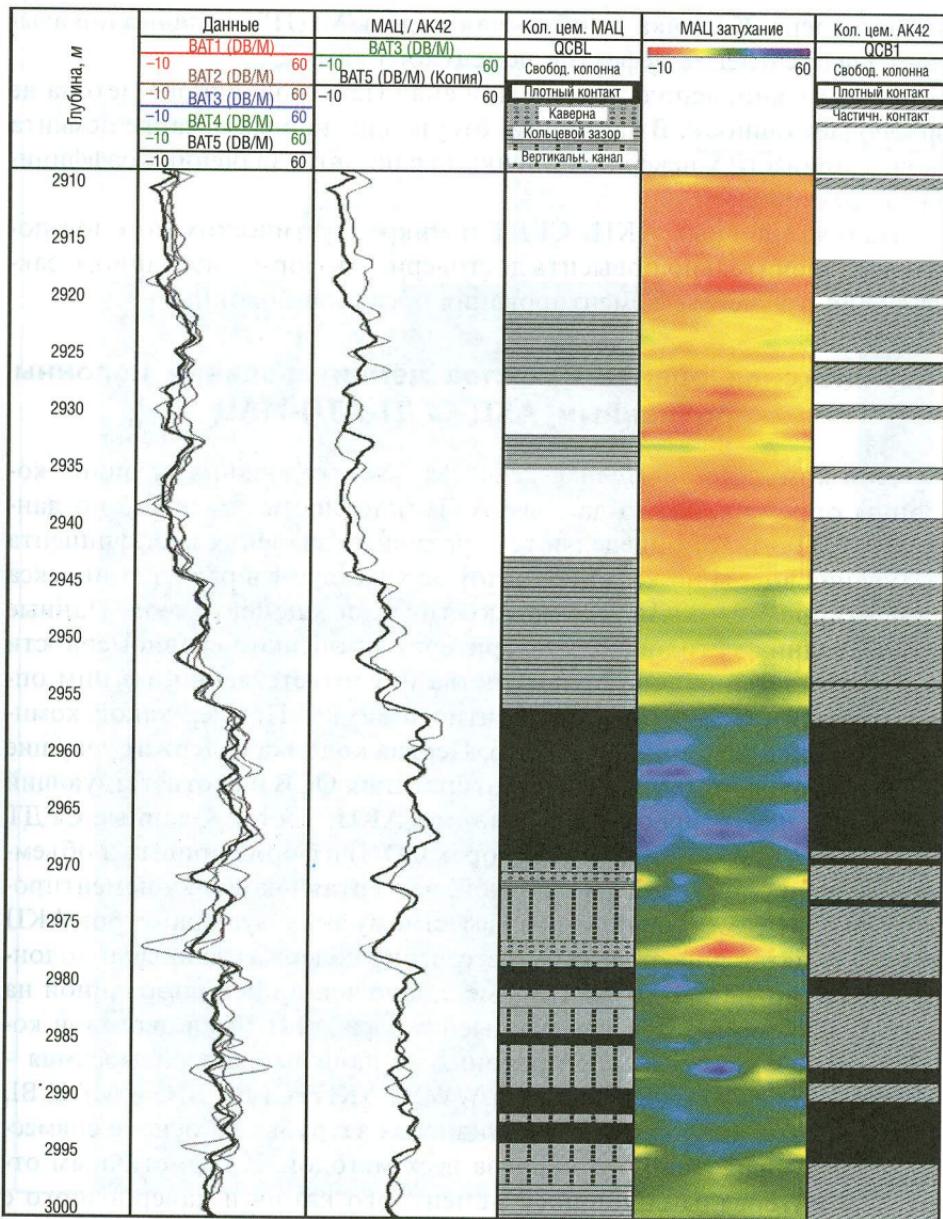


Рис. 4. Сравнение результатов оценки качества цементирования по данным МАЦ и АК-42

цементомера. Колонка 5 “объемная модель/МАЦ” наглядно показывает распределение дефектов цементного камня.

Естественно, использование при анализе только одного метода не исключает ошибок. В частности, отсутствие данных о марке цемента может привести к неверным оценкам граничных значений коэффициента затухания.

Наличие данных АКЦ, СГДТ и микроакустических методов позволяет значительно повысить достоверность формализованного заключения о качестве цементирования обсадной колонны.

Комплексная оценка качества цементирования колонны по данным АКЦ-СГДТ-АТП-МАЦ

При комплексной оценке качества цементирования толщина колонны определяется по данным АТП, плотность цемента – по данным СГДТ. Далее определяются граничные значения коэффициента затухания волны по колонне, которые участвуют в расчетах индекса цементирования АКЦ и микроакустического цементомера. Данные же последних методов служат критериями оценки неравномерности заполнения затрубного пространства и, соответственно, по ним определяются типы дефектов цементного камня. Пример такой комплексной оценки показан на рис. 5. Первая колонка содержит текущие глубины, вторая – колонку цементирования QCB и соответствующий ей индекс цементирования по данным АКЦ, третья – данные СГДТ (плотность цемента в шести секторах CDN) в форме кривых и объемной модели с цветовой кодировкой, четвертая – колонку цементирования QCBG, построенную по совместному анализу параметров АКЦ и СГДТ, пятая и шестая – соответственно содержат данные и колонку цементирования МАЦ в форме, аналогичной использованной на рис. 4. Шестая и седьмая – данные сканера АТП W_N в цветовой кодировке и колонку цементирования по данным сканера, восьмая – индексы цементирования сканера WWM, АКЦ+СГДТ BIG и МАЦ VI, девятая – колонку оценки герметичности затрубья на основе совместного формализованного анализа всех методов. К герметичным отнесены интервалы сплошного цементного камня и кавернозного с коэффициентом кавернозности не более 20%, определяемые не менее чем по двум методам. Совместное заключение существенно отличается от заключений по каждому из методов, однако оно более досто-

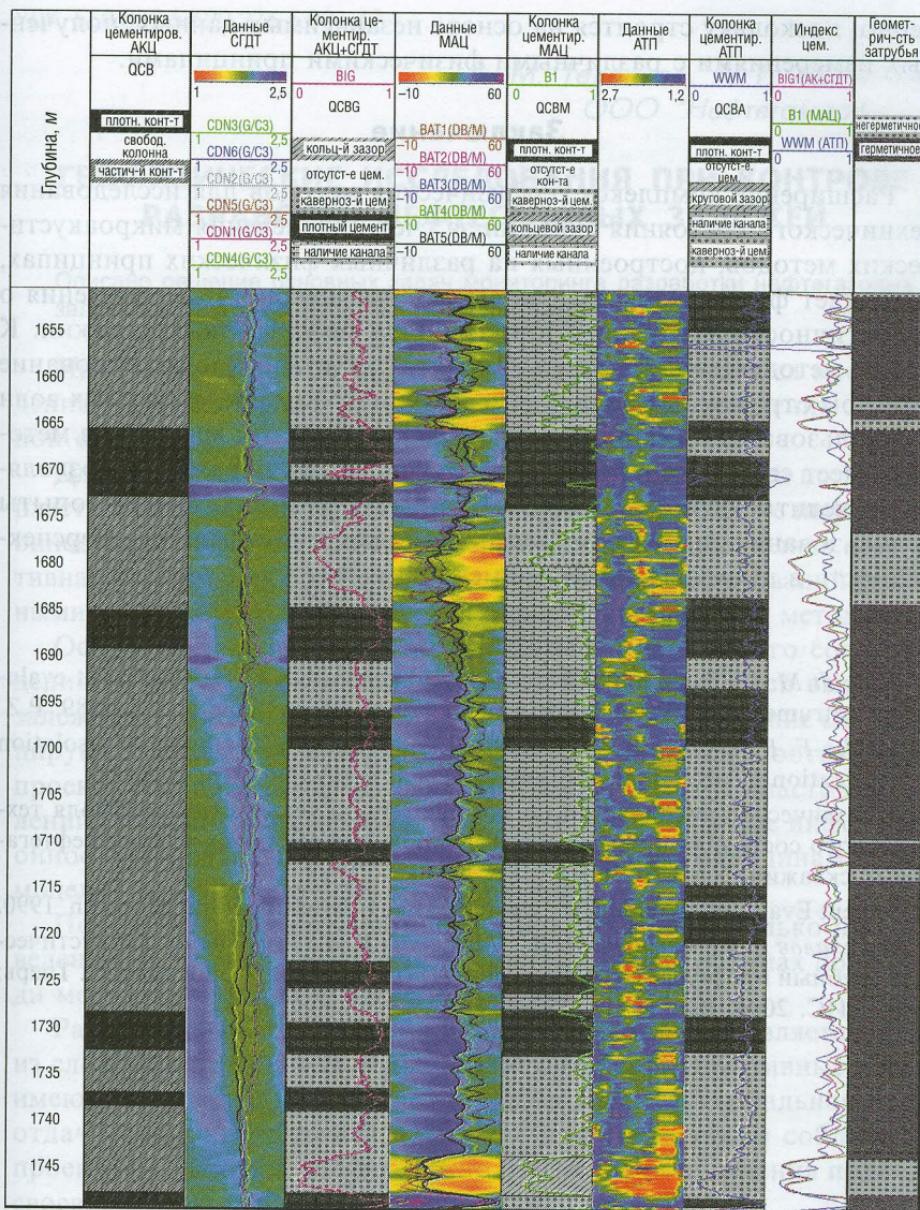


Рис. 5. Формализованная оценка герметичности затрубного пространства по данным методов: АКЦ–СГДТ–микроакустического (МАЦ) – акустического сканирования (АТП)

верно, поскольку строится на основе независимых данных, полученных измерениями с различными физическими принципами.

Заключение

Расширение комплекса геофизических методов для исследования технического состояния скважин за счет привлечения микроакустических методов, построенных на различных физических принципах, позволяет формализовать и повысить достоверность заключения о герметичности затрубного пространства нефтегазовых скважин. К таким методам прежде всего относятся акустическое сканирование методом отраженных волн и измерения методом преломленных волн с использованием секционированных зондов. Хотя каждый из методов имеет свои ограничения, в совокупности их параметры позволяют выделить различные дефекты цементного камня. Первые опыты использования такого комплексного подхода показали его перспективность в промышленном применении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schmidt M. G. The micro CBL – a second generation of radial cement evaluation instrument // SPWLA 30-th Annual Logging Sym. June 11–14, 1989. P.Z.
2. Stanko F. E., D'Angelo R. M. Method and apparatus for hydraulic isolation determination // US Patent #6018496. Int. Cl. G01V1/40. Jan. 25, 2000.
3. Методическое руководство по компьютерной технологии контроля технического состояния и качества цементирования обсадных колонн нефтегазовых скважин. Уфа: АО НПФ "Геофизика". 1997.
4. Cement Evaluation Guidelines: Western Atlas International Inc. Houston. 1990.
5. Варыхалов А. С., Белоконь Д. В., Пантиухин В. А., Рыбаков В. В. Акустический трубный профилемер-толщиномер АТП-73 // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2004. Вып.10–11 (123–124). С. 292.