

SPE-176655-RU

Оценка толщины стенки первых трех колонн в шельфовых скважинах с помощью магнитно-импульсной дефектоскопии

Арсалан Ансари, Зиад Либди, Наим Хан, / Закум Девелопмент Компани; Артур Асланян, Ирина Асланян, Максим Волков, Андрей Арбузов, Андрей Ачкеев, Фатхи Шнаиб, Руслан Махиянов/ ТГТ Оилфилд Сервисес

Авторское право 2015 г., Общество инженеров нефтегазовой промышленности

Этот доклад был подготовлен для презентации на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, 26 - 28 октября, 2015, Москва, Россия.

Данный доклад был выбран для проведения презентации Программным комитетом SPE по результатам экспертизы информации, содержащейся в представленном авторами реферате. Экспертиза содержания доклада Обществом инженеров нефтегазовой промышленности не выполнялась, и внесение исправлений и изменений является обязанностью авторов. Материал в том виде, в котором он представлен, не обязательно отражает точку зрения SPE, его должностных лиц или участников. Электронное копирование, распространение или хранение любой части данного доклада без предварительного письменного согласия SPE запрещается. Разрешение на воспроизведение в печатном виде распространяется только на реферат объемом не более 300 слов; при этом копировать иллюстрации не разрешается. Реферат должен содержать явно выраженную ссылку на авторское право SPE.

Резюме

При обслуживании нефтяных и газовых скважин как во время их эксплуатации, так и перед ликвидацией, требуется оценить их техническое состояние. Одной из главных задач по определению технического состояния скважины является определение мест изменения толщины стенок скважинных труб, связанных с коррозией, эрозией или другими механическими повреждениями. Особенный интерес представляют первые три колонны (барьера), обычно НКТ, эксплуатационная и техническая колонны. В случае конструкций скважин, оснащенных двумя параллельными НКТ, задача определения мест коррозии в эксплуатационных и технических колоннах еще больше усложняется.

Магнитно-импульсная дефектоскопия (MID) дает возможность одновременно определить коррозию сразу в нескольких колоннах. MID использует методику анализа нестационарного магнитного поля, при которой анализируется изменение намагниченности во времени, вызванное воздействием мощных электромагнитных импульсов от генератора. На регистрируемом спаде намагниченности информация от каждого барьера проявляется в разное время, что и позволяет не только определить влияние каждого барьера, но и численно определить их толщину. Для оценки толщины требуется проводить моделирование каждого зарегистрированного спада, и поскольку количество таких спадов при типичном исследовании огромно и может достигать несколько сотен тысяч, для ускорения моделирования вычисления выполняются на многоядерных процессорах с использованием технологий параллельных вычислений. Алгоритм расчета толщин металлических труб был протестирован на лабораторных установках, имитирующих многоколонные скважинные конструкции от 2 7/8" до 13 3/8", где были сделаны дефекты различных форм размерами от 7 мм до 140 мм.

В данной статье приводятся результаты лабораторных, а также полевых испытаний демонстрирующих применение аппаратного-программного комплекса MID для определения степени коррозии в первых трехбарьерных конструкциях скважин с двумя параллельными НКТ без

необходимости их извлечения:

- Скважина W-01 в которой были обнаружены коррозии во 2-м и 3-м барьерах, 9 5/8" и 13 3/8" колоннах образованные на одной глубине;
- Скважина W-02 в которой место коррозии было определено во 2-м барьере (в колонне 9 5/8") в интервале присутствия двух параллельных НКТ и подтверждено при повторном исследовании MID после извлечения НКТ;
- Скважина W-03 сквозная коррозия во 2-м и 3-м барьерах (в колоннах с большими диаметрами 9 5/8" и 13 3/8") была определена через колонну 7" и подтверждена с помощью исследований высокочувствительной термометрии и спектральной шумометрии.

Полученные результаты исследований позволили провести технические мероприятия по ликвидации нарушений.

Введение

Среднее время эксплуатации добывающей или нагнетательной скважин в неагрессивной среде составляет от 20 до 30 лет (Shahalin R.R., 2012), причем в сероводородной среде или при наличии углекислого газа время жизни скважины значительно сокращается: до 2-5 лет. В течение этого времени качество цементного камня, его контакт с колонной и непосредственно состояние колонны ухудшается в зависимости от различных факторов, например, неправильным выбором типа цемента, заполняющего межтрубье ингибитора, а также режимов эксплуатации. Согласно (Shahalin R.R., 2012), каждая пятая добывающая скважина или каждая третья нагнетательная скважина имеет проблемы, связанные с техническим состоянием скважины, среди которых коррозия НКТ, колонн, муфтовых соединений, а также других элементов конструкции скважины (Hans-Emil Bensnes, 2012).

Исследование скважины на степень коррозии первого металлического барьера, которым обычно является НКТ, с помощью MID ранее уже было описано. Например, сквозные коррозии, обнаруженные MID были подтверждены на поверхности после извлечения НКТ. Также, существует много разных методик поиска коррозии и дефектов в первом барьере, таких как многорычажный микропрофиломер (Maxted, L., 1995) или приборов акустического сканирования внутренних поверхностей стенок колонны (CAT), а сквозная коррозия может быть обнаружена с помощью расходометрии и термометрии (Khalil, I.N, 2012).

В данной работе делается упор на анализ второго и третьего барьера, обычно эксплуатационной и технической колонны, когда прибор физически изолирован от исследуемых колонн одним или двумя барьерами, тем самым поиск и оценка мест коррозии скважинного оборудования значительно осложнены.

Была проведена серия исследований по оценке технического состояния эксплуатационных и технических колонн в скважинах с двумя параллельными НКТ. Три исследования были выбраны с целью демонстрации возможностей Магнитно-импульсной дефектоскопии для поиска и оценки коррозий во втором и третьем барьерах. Оценка коррозии колонн производя исследование через НКТ делает технологии экономически выгодной, так как отсутствует необходимость извлечения труб на поверхность.

Технология

Принцип обнаружения мест коррозий электромагнитными дефектоскопами, работающими в частотной области

Электромагнитные дефектоскопы бывают двух типов: дефектоскопы, которые работают в частотной области, и дефектоскопы, работающие во временной области. Принцип работы первой группы методов следующий: генераторная катушка создает переменное электромагнитное поле фиксированной частоты, а приемная катушка регистрирует затухание амплитуды и фазовый сдвиг. Простые математические модели позволяют сделать оценку суммарной толщины металла на качественном уровне в многобарьерном случае, например, при анализе в интервалах присутствия НКТ и колонны за ней. Присутствие третьего металлического барьера в интервале исследования значительно осложняет интерпретацию и часто в таких случаях производится грубая оценка суммарной толщины трех барьеров.

В зависимости от конструкции прибора некоторые такого типа дефектоскопы сканируют только первый барьер (Donald C. Vogtsberger, 2005), в то время как другие сканируют сразу несколько барьеров. В любом случае определить в каком по счету барьере произошла коррозия, не представляется возможным. (Claudio Castaneda, 2014). Для этого необходимо использовать достаточно много различных частот и проводить их калибровку на конструкцию исследуемой скважины.

Электромагнитная дефектоскопия с анализом спада во временной области для поиска и оценки коррозий в многобарьерных конструкциях скважин

Принцип работы электромагнитного дефектоскопа работающего во временной области основан на генерировании катушкой квадратных по форме импульсов, соответствующих бесконечному количеству гармонических колебаний. Во время генерации импульса намагничивается металл вокруг катушки, а по его окончанию происходит спад намагниченности, который регистрируется приемными катушками как значение индуцированного тока. Профиль данного спада достаточно сложный и содержит информацию о диаметре, электрической проводимости, магнитной проницаемости, а также толщине всех исследуемых барьеров. Восстановление этой информации из спада намагниченности отдельно для каждого из изучаемых барьеров является сложной математической процедурой. Алгоритм обработки MID состоит из двух модулей: симулятора спадов и алгоритма адаптации. Симулятор спадов решает численно уравнение Максвелла для радиально-симметричных много барьерных конструкций с произвольным диаметром, электрической проводимостью, магнитной проницаемостью и толщиной каждого барьера. Каждый прибор MID проходит тщательную калибровку на заводе таким образом, чтобы замеренный спад намагниченности соответствовал спаду смоделированному для данной конструкции стенда. Алгоритм адаптации создает оптимизированный цикл адаптации модельных спадов намагниченности к замеренным. Как правило результатами работы данного симулятора являются три набора данных

- Толщина
- Электромагнитные свойства: электропроводность и магнитная проницаемость, характеризующая тип используемой трубы
- Эксцентриситет

Принцип разделения барьеров основан на факте, что разные по диаметру барьеры влияют на замеренный спад в разное время. Влияние каждого барьера можно оценить адаптируя спад во всем его временном интервале. Чем большим количеством каналов оцифрован спад, тем accuratнее можно сделать разделение между влиянием каждого барьера. Более детальное описание данной технологии представлено в статье (Aslanyan A.M., 2014).

Спецификация и принцип действия прибора MID

На текущий момент Магнитно-импульсной дефектоскоп (MID) представлен двумя приборами:

- MID-2 для исследования первых двух барьеров от 2 7/8" до 7"
- MID-3 для исследования колонн от 9 5/8" до 13 3/8"

Конструкция прибора приведена на рисунке 1, а его спецификация приведена в таблице 1.

С целью сканирования в широком диапазоне труб в комплексном приборе MID соосно установлены три сенсора различной длины: короткий – 5" и средний – 13" (автономный модуль MID-2), а также длинный 19" (автономный модуль MID-3).

Каждый из этих сенсоров состоит из генерирующей и принимающей электромагнитной катушек, обмотанных вокруг композитного стержня. Катушки расположены в одном месте, что позволяет избежать ложных эффектов напротив дефектов или элементов конструкции скважины.

В зависимости от поставленных задач, можно использовать либо один из модулей, либо оба в связке. В таблице 2 приведены границы применимости каждого из модулей. В том случае, когда стоит задача определения толщины первых трех металлических труб различного диаметра, рекомендуется использовать оба модуля в синхронном режиме. Генерирование импульса и регистрация спада каждого сенсора происходит последовательно в разное время.

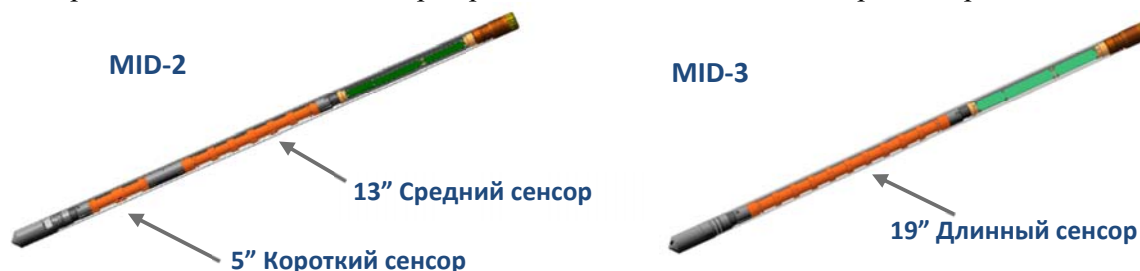


Рисунок 1. Схема прибора MID

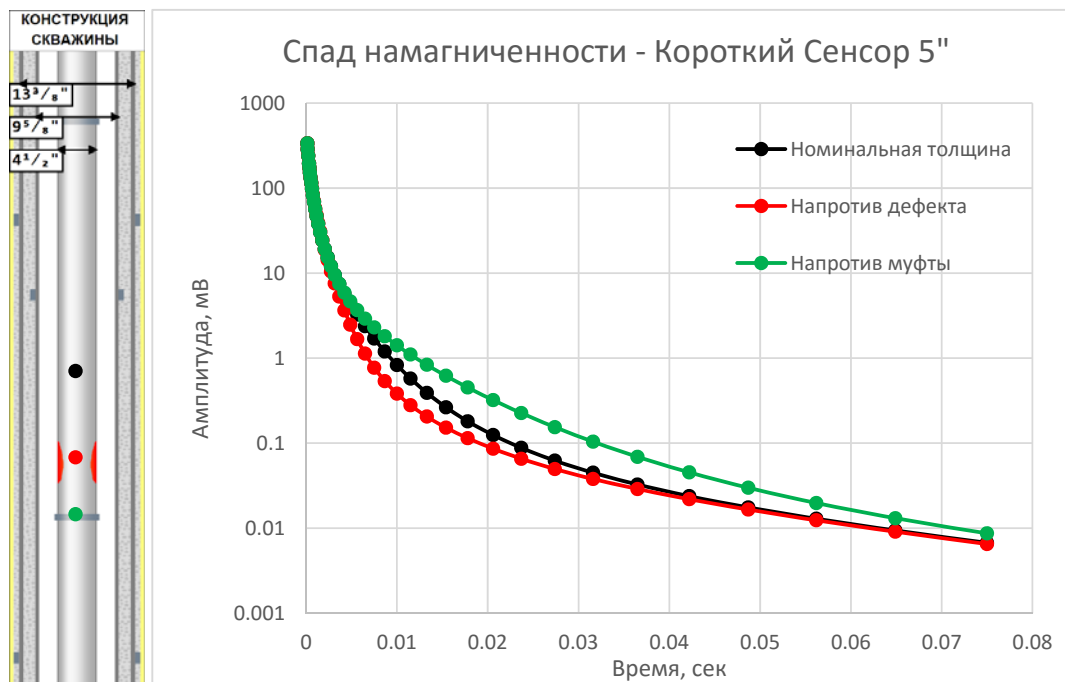
Таблица 1. Спецификация прибора

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих температур	-20 – 150°C (-4 – 302°F)
Максимальное давление	100 МПа (14,500 фунт/дюйм ²)
Максимальная концентрация H ₂ S	30%
Максимальная суммарная толщина стенок колонн скважины	38 мм (1.5")
Диаметры изучаемых труб	51– 381 мм (2"-15")
Рекомендуемая скорость исследования	2-4 м/мин (6-12 фут/мин)
Время автономной работы	48 ч

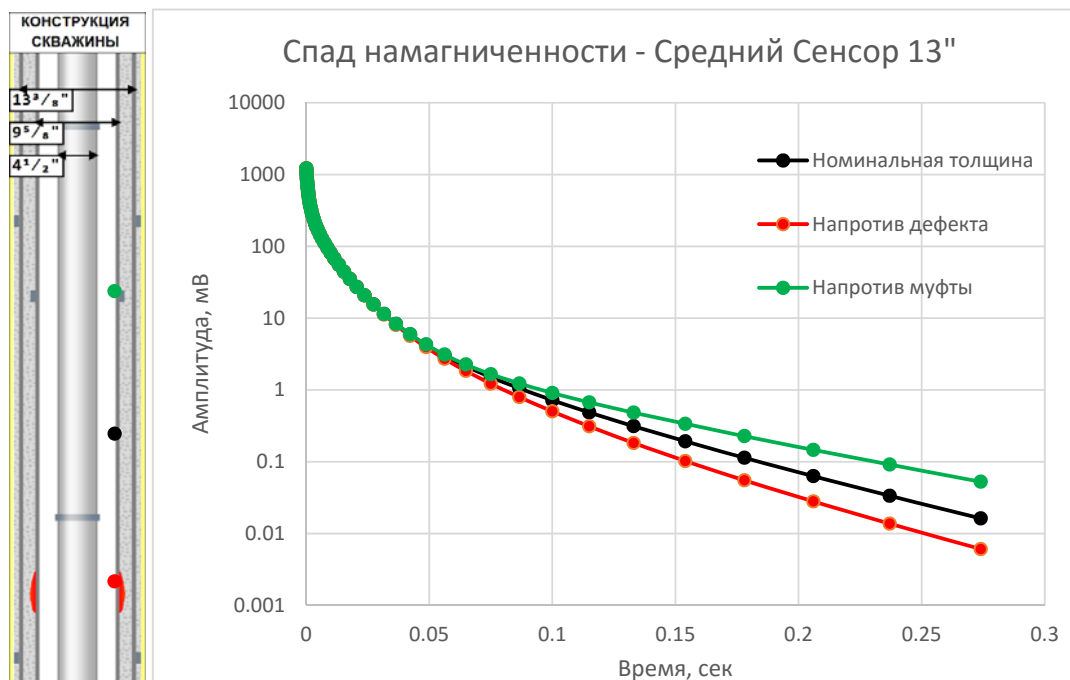
Проявление коррозии на спадах намагниченности

На рисунке 2 изображены зарегистрированные спады в типичной трехбарьерной конфигурации скважин: 4 1/2" НКТ, 9 5/8" эксплуатационная колонна и 13 3/8" техническая колонна. На рисунке 2а показаны спады, замеренные коротким сенсором 5" в зоне дефекта НКТ, муфты НКТ, а также в зоне отсутствия каких-либо нарушений в НКТ. На рисунке 2б спады были зарегистрированы средним 13" сенсором модуля MID2 напротив дефекта и муфты эксплуатационной колонны 9 5/8", а также в зоне номинальной её толщины. Рисунок 2в показывает работу длинного 19" сенсора напротив дефекта и муфты третьей по счету технической колонны. Во всех перечисленных случаях уменьшение массы металла составляла не более 10%.

2а)



2б)



2в)

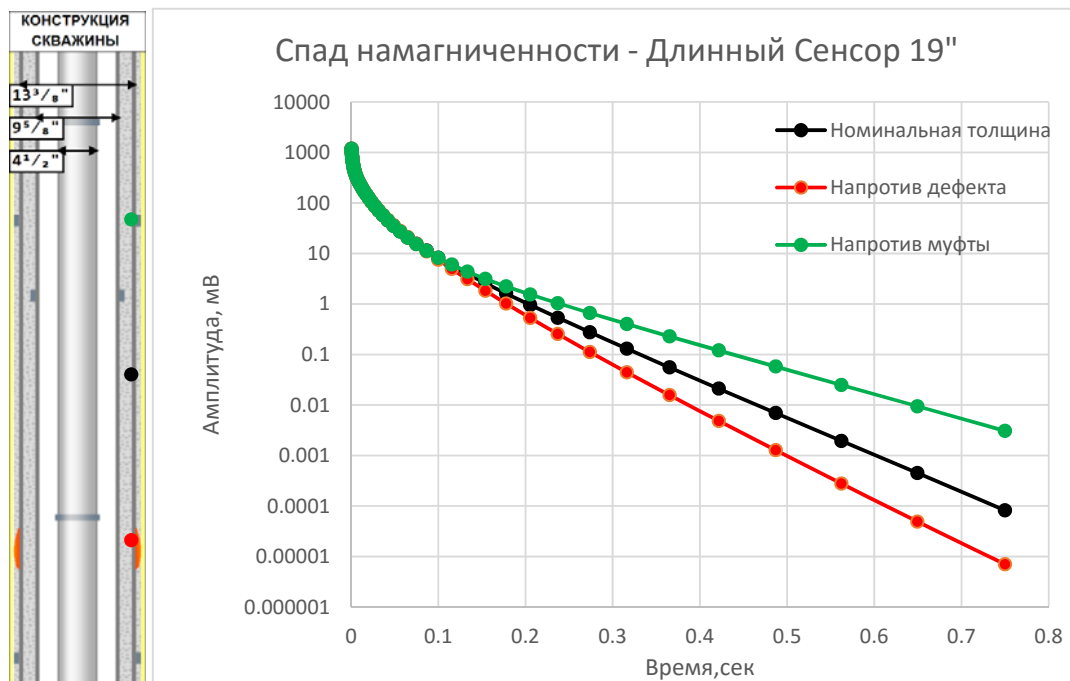


Рисунок 2: Спады намагненности, замеренные комплексным прибором MID в скважинной конструкции 4 1/2", 9 5/8", 13 3/8". 2а: Спад, зарегистрированный коротким сенсором 5" в барьере 4 1/2", в случаях: а) номинальной толщины, б) 10% коррозии и в) муфты. 2б: Спад, зарегистрированный средним сенсором 13" в одной и той же колонне 9 5/8" через 4 1/2" НКТ в зоне номинальной толщины колонны 9 5/8", 10% коррозии колонны 9 5/8" и муфты 9 5/8". 2в: Спад, зарегистрированный средним сенсором MID3 в одной и той же колонне 13 3/8" через 4 1/2" НКТ и 9 5/8" в зоне номинальной толщины колонны 13 3/8", 10% коррозии колонны 13 3/8" и муфты 13 3/8".

Короткий сенсор, длиной 5", излучает короткие электромагнитные импульсы и оптимален для исследования труб НКТ и колонн малых диаметров (до 5"). Размер сенсора определяет также минимальный размер обнаруживаемых дефектов, который для короткого сенсора составляет примерно 0.9".

Средний сенсор, длиной 13", оптимизирован для сканирования колонн до 10". Поскольку электромагнитные импульсы этого сенсора больше по амплитуде и величине, чем у короткого, то он способен фиксировать дефекты более дальних, второй и третьей труб, имеющих диаметры от 2" до 10". Минимальный размер регистрируемых дефектов составляет 1.8".

Влияние коррозии во втором барьере на регистрируемый средним сенсором спад намагниченности в случае модельной 3-х барьерной конструкции (3-1/2", 9-5/8" и 13-3/8") показано на рисунке 2б.

Длинный сенсор, длиной 19", генерирует наиболее продолжительные и высокоамплитудные электромагнитные импульсы и регистрирует отклик от металлических барьеров, проявляющийся на более поздних временах спада намагниченности. Данный сенсор оптимизирован для исследования конфигурации вложенных труб с общей толщиной до 1.5". Диаметр исследуемых колонн не должен превышать 15". На рисунке 2в показан зарегистрированный спад намагниченности для 3-х барьерной конструкции (3-1/2", 9-5/8" и 13-3/8"), в случае коррозии в третьем барьере и в случае муфтового соединения труб.

В целом, MID может быть использован для исследования коррозий в НКТ и колоннах с общей толщиной стенок трёх барьеров до 1.5" и диаметром до 15", что охватывает более 90% работающего фонда скважин. В это число скважин входят также скважины с параллельными трубками.

Обработка данных магнитно-импульсной дефектоскопии

Скважинный прибор MID работает в нестационарном импульсном режиме и регистрирует эволюцию спадов намагниченности во времени на каждой глубине, что формирует огромные массивы данных для интерпретации. Так, при типичном исследовании интервала в 3,000 метров и скоростью движения прибора 2 м/мин в общей сложности с каждого сенсора регистрируется 46,000 спадов. Все спады намагниченности оцифровываются временными каналами и в случае работы в автономном режиме записываются в память прибора для дальнейшей обработки.

На рисунке 3 представлен весь набор оцифрованных данных комплексного прибора MID: данные с короткого 5" сенсора представлены на панели КОРОТКИЙ ЗОНД (MID-2) 42-мя временными каналами, со среднего сенсора на панели ДЛИННЫЙ ЗОНД (MID-2), данные представляются на 51-м канале. Данные длинного сенсора записываются 91 временным каналом на панели ДЛИННЫЙ ЗОНД (MID-3).

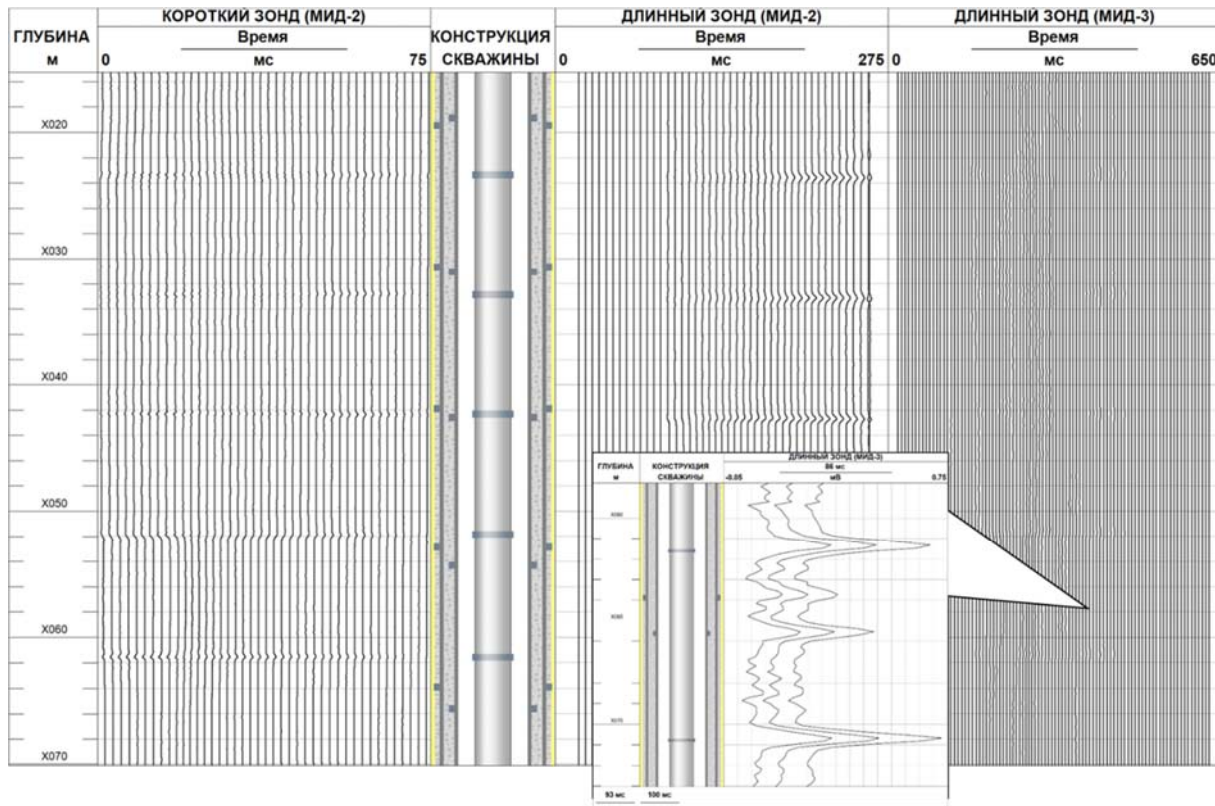


Рисунок 3. Исходные данные комплексного прибора MID. На панели КОРОТКИЙ ЗОНД (МИД-2) представлены спады намагниченности, оцифрованные 42 временными каналами 5” сенсора, на панели ДЛИННЫЙ ЗОНД (МИД-2) - 51 каналами 13” сенсора (МИД-2) и на панели ДЛИННЫЙ ЗОНД (МИД-3) - 91 каналами 19” сенсора.

На рисунке 3 также изображено увеличенное изображение каротажных кривых, записанных длинным 19” сенсором – на них видны муфты каждого из трех барьеров скважинной подвески. Это свидетельствует о том, что каждая каротажная кривая содержит в себе совокупную информацию о всех сканированных барьерах. Поэтому для количественной оценки степени коррозии в скважине недостаточно использовать данные конкретного сенсора или тем более временного канала, необходимо делать совместный анализ всей совокупности данных, полученных со всех сенсоров.

Применение моделирования в магнитно-импульсной дефектоскопии

Для количественной интерпретации всего массива данных MID было разработано специальное программное обеспечение - MID симулятор, основанный на численном решении уравнении Максвелла (Aslanyan, A.M., 2014). В случае коаксиально симметричной конструкции скважины уравнение записывается в виде:

$$\frac{\sigma(r,z) \cdot \mu_0}{r} \cdot \frac{\partial r E_\phi(r,z)}{\partial t} = \operatorname{div} \left\{ \frac{1}{\mu(r,z) \cdot r} \cdot \operatorname{grad}(r \cdot E_\phi(r,z)) \right\} + \mu_0 \frac{\partial j(r,z)}{\partial t} \quad (1)$$

где: z – расстояние вдоль оси скважины; r – расстояние перпендикулярно оси скважины; $\sigma(r, z)$ – пространственное распределение электропроводности; $\mu(r, z)$ – пространственное распределение электромагнитной проницаемости; $E_\phi(r, z)$ – осевая составляющая электромагнитного поля; $j(r, z)$ – ток генерирующей катушки и μ_0 – значение магнитной проницаемости в вакууме.

В случае конструкции скважины с двумя параллельными НКТ это уравнение несколько усложняется, однако принцип остается неизменным.

На рисунке 4 представлены результаты симуляции модельного случая: модель представляет собой трехбарьерную конструкцию: первым барьером является стенка НКТ 2 3/8", вторым – колонны 5 1/2", а третьим – колонны 7". Цветом показано распределение электромагнитных полей и индуцированные токи во всех перечисленных барьерах.

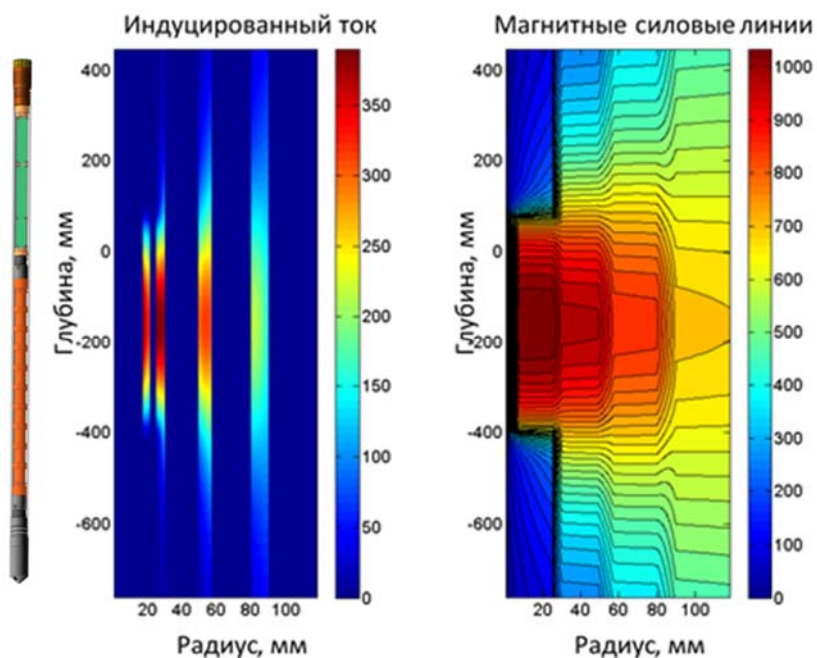


Рисунок 4 Распределения электрических токов (а) и структура электромагнитного поля в НКТ, эксплуатационной и технической колонне (б), вызванных импульсами с длинного сенсора MID-3.

MID симулятор динамически подстраивается под конкретные параметры скважины и свойства металлов. Симулятор учитывает диаметры труб, электрическую проводимость и магнитную проницаемость металлов (существенно зависящие от содержания примесей, например, хрома, марганца, углерода). Отдельно стоит отметить, что моделирование учитывает данные со всех трёх сенсоров скважинного прибора, добиваясь на каждой глубине совпадения реальных и модельных откликов.

Учет конструкции скважины. Децентрализация трубок НКТ

Основным преимуществом метода численного моделирования является возможность производить расчеты в нестандартных и сложных конструкциях скважин, как, например, в скважинах, оборудованных двумя параллельными трубками НКТ для раздельной эксплуатации различных объектов. Основные проблемы таких скважин — это децентрализация трубок, т.е. отклонение положения трубок от центра, что необходимо учитывать. Причем для правильного расчёта степени коррозии колонн необходимо проводить исследования MID в обоих трубках.

Определение одновременной коррозии в двух соседних барьерах

Спады намагниченности, замеренные всеми тремя сенсорами MID, являются в общем случае результирующими откликами от всех сканированных барьеров. Поэтому каждый временной канал (спад намагниченности, оцифрованный в определенном временном окне) каждого сенсора в многобарьерной конструкции (см. рисунок 3) содержит в той или иной степени отклики от всех барьеров. Следовательно, традиционные методы, когда выделяется какой-то один временной канал, где более всего проявляется влияние соответствующего барьера, и путем нормировки вычисляется его толщина, имеют значительную погрешность, достигающую 30-40% в условиях коррозии соседних барьеров. Численное моделирование единственный метод, который способен в таких сложных случаях определить степень коррозии в каждом из барьеров.

Влияние ближайшего к прибору, первого барьера на замеренные спады намагниченности значительно выше, чем второго или, тем более, третьего барьеров. Поэтому при наличии дефекта в первом барьере корректно определить толщину второго и третьего барьеров труднее, особенно если диаметры труб большие и слабо отличаются друг от друга, например, в случае компоновки скважины с 7" и 9 5/8" колоннами.

Оптимизация времени при моделировании

Поиск коррозий в многобарьерных скважинах является затратным по времени процессом (Aslanyan, A.M., 2014), причем время обработки данных кратно возрастает с ростом числа барьеров. Так, для трехбарьерного случая, являющегося предметом данной статьи, количество промоделированных спадов в скважине может достигать сотен тысяч. Чтобы ускорить процесс обработки данных, был разработан новый алгоритм, который позволил уменьшить время интерпретации типичной трехбарьерной скважины до нескольких часов. Все расчеты осуществляются на удаленном суперкомпьютере, доступ к которому возможен с обычного компьютера через сеть интернет.

Входящие и исходящие параметры моделирования

Входными параметрами MID симулятора являются номинальные толщины труб и колонн, а также их электромагнитные свойства электрическая проводимость и магнитная проницаемость – на каждой глубине. Также входящими параметрами моделирования являются параметры генерирующих/приемных катушек, например, амплитуда импульса, размер сенсора и время наблюдения. В моделировании используются данные, замеренные всеми тремя сенсорами.

На рисунке 5 приведены кривые толщин трех барьеров, рассчитанные с использованием алгоритма адаптации в реальном времени, пунктиром отмечен интервал ошибок изменения толщин. Муфты колонн на этих кривых проявляются как увеличение от номинального значения из-за большего количества металла (отмечено синим), уменьшение же объема металла на определенной глубине интерпретируется как коррозия (отмечено коричневым). В данном случае погрешность расчета толщины трубы 4 1/2" составила 3.5% от номинальной толщины, для колонн 9 5/8" и 13 3/8" 6% и 12% от номинальной толщины, соответственно.

Кривые толщин становятся более шумными по мере удаления барьера от прибора, что связано с увеличением погрешности расчета толщин с увеличением объема металла на данной глубине. Дополнительную погрешность при расчете толщины оказывают остаточная намагниченность и децентрализация труб относительно центра скважины.

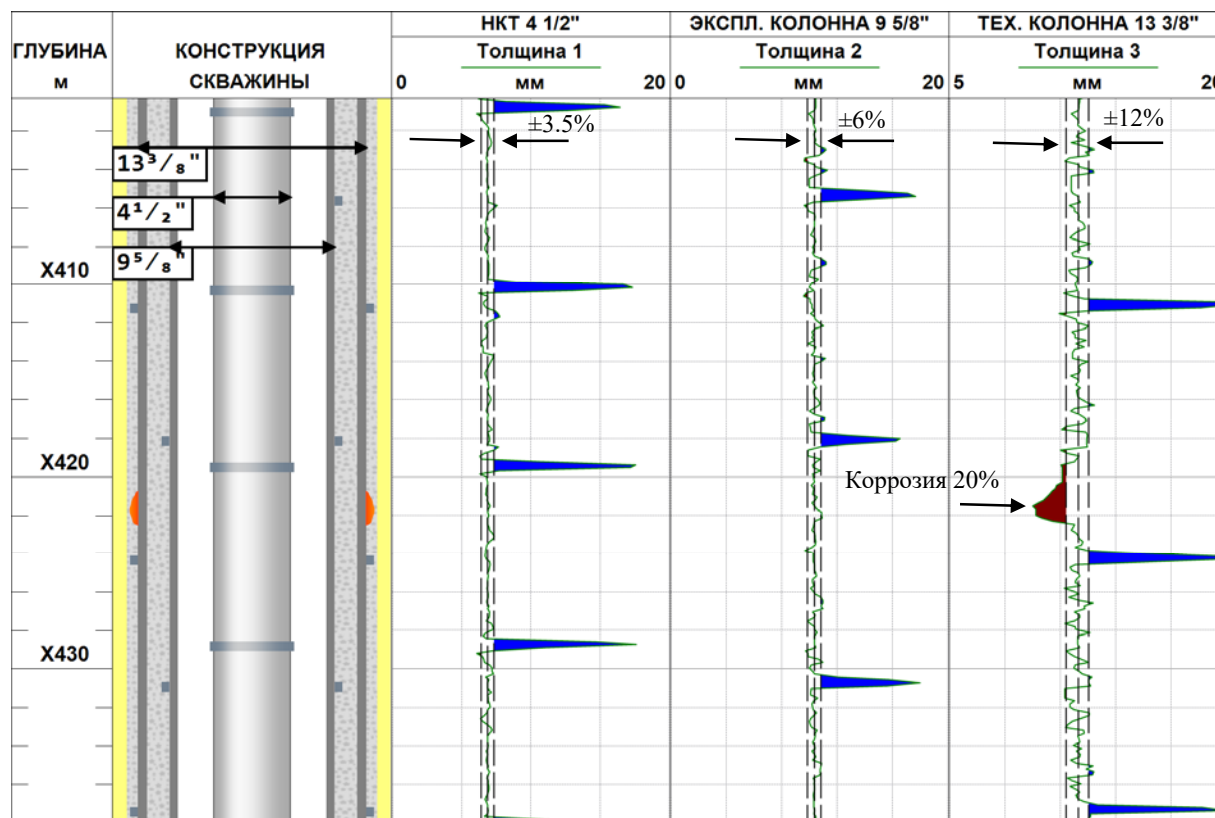


Рисунок 5. Толщины, рассчитанные по алгоритму адаптации спадов в реальном времени. Слева направо: толщина НКТ 4 1/2", толщина эксплуатационной колонны 9 5/8", толщина технической колонны 13 3/8"

Визуализация данных моделирования и интерпретации. Панель Delta

Для визуального анализа всей совокупности обработанных данных прибора MID с помощью MID симулятора, они представляются в виде цветной панели ДЕЛЬТА (Aslanyan, A.M., 2014). Панель ДЕЛЬТА показывает разницу между зарегистрированным спадом намагниченности и модельным:

$$\Delta(t) = \frac{U_R(t) - U_{\text{model}}(t)}{U_{\text{model}}(t)}, \quad (2)$$

где $U_R(t)$ замеренный спад, $U_{\text{model}}(t)$ модельный спад для заданных электромагнитных и геометрических параметров конструкции. Теоретически, ДЕЛЬТА панель должна быть белой в зонах с хорошей сходимостью с моделью и цветной напротив дефектов где модель МИД не точна. В реальности, все элементы конструкции и дефекты отклоняются от модели и панель ДЕЛЬТА ярко реагирует на эти отклонения от модели яркими пятнами (см. рис.6). Более того, многие незначительные дефекты, которые трудно различимы на кривых толщин, оставляют контрастный след на ДЕЛЬТА панели. Это расширяет зону применения ДЕЛЬТА панели до количественного анализа коррозии. Программный пакет МИД включает в себя алгоритм Автоматического Распознавания Дефектов (АРД), который сканирует кривые толщин и ДЕЛЬТА панель, и автоматически определяет дефекты в различных колоннах. Это экономит много интерпретационного времени и предотвращает случайные ошибки, которые так часто появляются в обычной рутинной интерпретации.

На рисунке 6 показаны ДЕЛЬТА панели для всех трех сенсоров комплексного прибора MID в случае конструкции скважины с колоннами 4 1/2", 9 5/8" и 13 3/8". Панель КЗ ДЕЛЬТА отображает отклонение зарегистрированного спада короткого сенсора 5" от модельного, панели ДЗ ДЕЛЬТА MID-2 и ДЗ ДЕЛЬТА MID-3 отклонение замеренных спадов намагниченности среднего сенсора 13" и длинного сенсора 19" от спадов, полученных в ходе моделирования.

На вертикальной оси панели откладывается глубина, на горизонтальной – время, а цветом отображается величина сигнала (см. рисунок 6). Белому цвету на панели ДЕЛЬТА соответствует совпадение реального спада с моделью. В случае, если амплитуда реального спада больше модельного, то на панели проявляется синее пятно, характерное для муфт, центраторов и других элементов конструкции, содержащих металл, в обратном случае цвет пятна на панели красный, что интерпретируется как коррозия, перфорация и т.п.

Панели содержат дополнительные вертикальные линии коррозии (CL), которые во временном масштабе локализуют положение конкретного барьера данной конструкции на спадах намагниченности. Положение линии коррозии может незначительно изменяться от типа конструкции и электромагнитных свойств металла сканируемых трубок, например, для трубок из нержавеющей стали линия CL смещается в сторону более ранних времен.

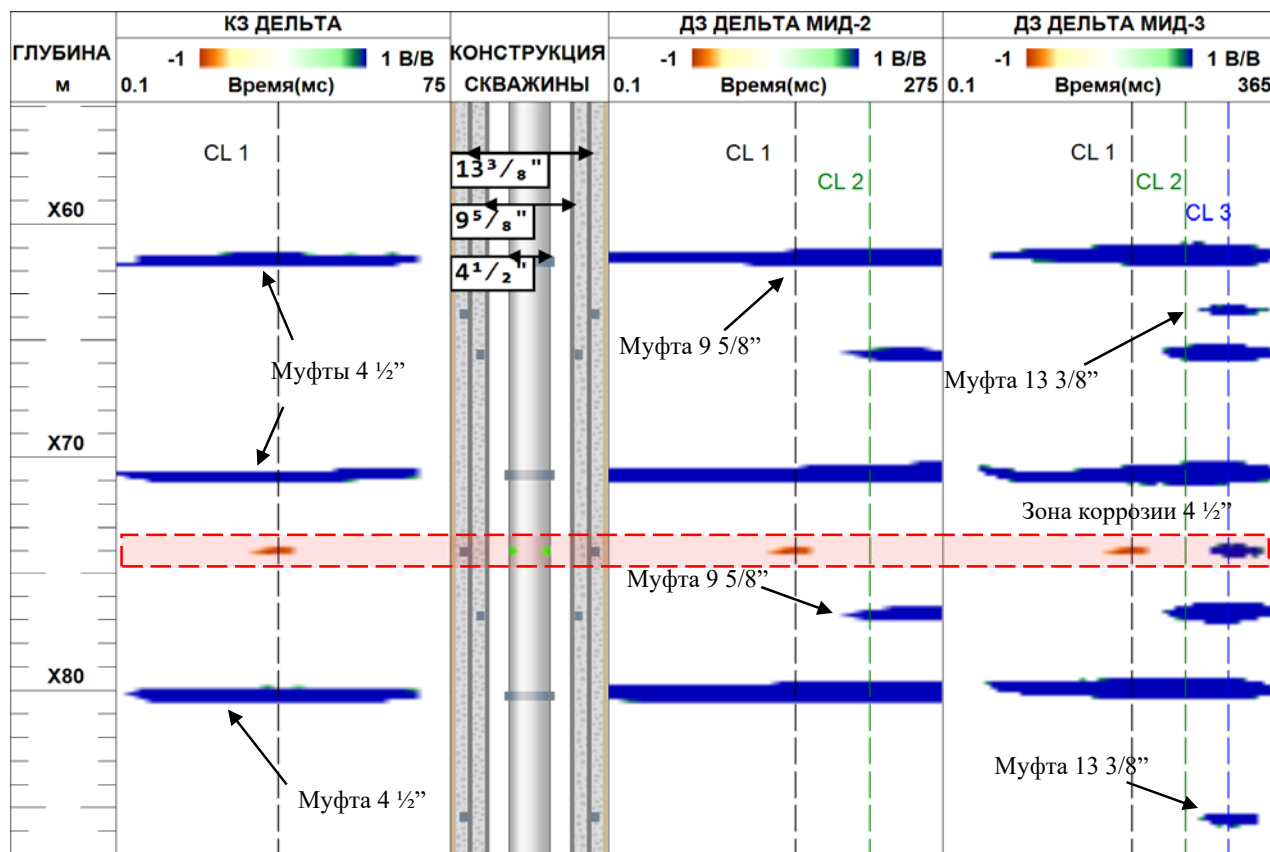


Рисунок 6. Цветные панели ДЕЛЬТА: слева направо КЗ ДЕЛЬТА, ДЗ ДЕЛЬТА MID-2, ДЗ ДЕЛЬТА MID-3. Панель КЗ ДЕЛЬТА MID-3 содержит информацию о всех трубах, спущенных в скважину НКТ 4 1/2", колонны 9 5/8" и колонны 13 3/8". Наличие коррозии в НКТ проявляется как красное пятно и наблюдается на всех трех панелях, пересекая линию коррозии CL1.

Лабораторные испытания

Результаты симуляций различных модельных конструкций были верифицированы многочисленными лабораторными и полевыми тестами: проводилась проверка алгоритма расчета толщины, а также определялось характерное время появления коррозий на спадах намагниченности для каждого барьера. Всего в период с 2009 по 2015 годы было проведено свыше 1500 различных лабораторных экспериментов.

Другим типом задач, который решался с помощью лабораторных тестов, являлось определение чувствительности прибора MID к различным дефектам типа сквозного отверстия или продольной и поперечной трещин в различных конструкциях.

Расчет степени коррозии каждого барьера производился по формуле:

$$\text{Степень коррозии} = \frac{V_{\text{дефекта}}}{V_{\Phi}} \cdot 100\% \quad (3)$$

где $V_{\text{дефекта}}$ – объем дефекта; V_{Φ} – объем участка трубы длиной 1 фут.

В результате лабораторных экспериментов определены минимальные дефекты и соответствующие им степени коррозии на 1 фут (см. таблицу 2), которые можно найти прибором MID. Видно, что при увеличении количества барьеров, размер минимально детектируемого дефекта увеличивается. Также отмечается увеличение минимального размера коррозий в случае лабораторного стенда с двумя параллельными трубками НКТ.

Таблица 2. Значения минимальных размеров дефектов и потерь металла, зарегистрированных прибором MID

Лабораторный стенд	Минимальный размер дефектов (степени коррозии)		
	В 1 барьере	Во 2 барьере	В 3 барьере
13 ³/₈	101.6 мм (1.6%)	-	-
9 ⁵/₈ + 13 ³/₈	76.2 мм (1.2%)	172.7 мм (4.5%)	-
3 ¹/₂ + 9 ⁵/₈ + 13 ³/₈	22.9 мм (1.2%)	142.2 мм (4.3%)	215.9 мм (7.1%)
3 ¹/₂ (2 НКТ) + 9 ⁵/₈ + 13 ³/₈	22.9 мм (1.2%)	213.3 мм (9.6%)	322.6 мм (15.9%)

Лабораторный эксперимент №1: Проверка работы оптимизированного алгоритма расчета толщины

На рисунке 7 приведены результаты лабораторного эксперимента по верификации алгоритма расчета толщины барьеров при помощи MID симулятора. Лабораторный стенд состоял из двух коаксиальных труб с диаметрами 3 1/2" и 9 5/8". Данные регистрировали комплексным прибором MID.

Смоделированные толщины барьеров (показаны зелеными линиями) сравниваются с толщинами барьеров, рассчитанными с использованием палеток (показаны синими линиями). Для расчета толщин в обоих случаях использовались одни и те же входные данные. Численные результаты лабораторного эксперимента приведены в таблице 3, где красным цветом отмечены отклонения от номинала, превышающие 0.25 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что расчет толщин барьеров с помощью моделирования является более точным по сравнению с методами с использованием палеток. Более того, при моделировании можно производить расчет даже в трубах с нестандартным диаметром – а такое встречается на практике достаточно часто. Ранее неопределенность номинальной толщины труб вносила большие погрешности при количественной оценке протяженных по размеру коррозий.

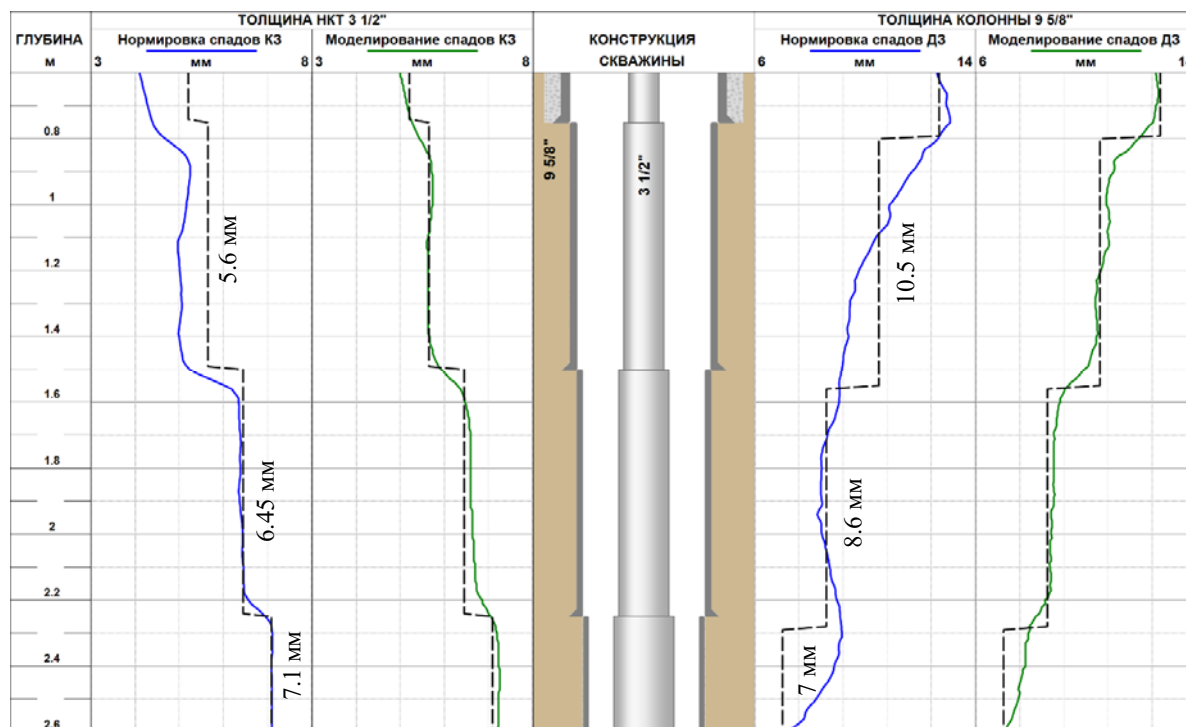


Рисунок 7. Лабораторный эксперимент: сравнение толщины труб, полученных с использованием палеток (синие кривые), с теми, что получены с помощью MID симулятора (зеленые кривые).

Таблица 3. Результаты расчетов толщин труб с помощью моделирования и с помощью палеток.

Интервал, м		Толщина стенки, мм					
		Труба 3 1/2"			Труба 9 5/8"		
от	до	номинал	палетки	модели- рование	номинал	палетки	модели- рование
0.0	0.75	5.2	4.2	5.0	12.7	12.9	12.6
0.75	1.5	5.6	5.1	5.6	10.5	10.1	10.5
1.5	2.25	6.45	6.4	6.6	8.6	8.5	8.8
2.25	3.0	7.1	7.1	7.2	7	7.5	7.2

Лабораторный эксперимент №2: Определение места коррозии в третьем барьере - технической колонне 13 3/8"

На рисунке 8 представлены результаты другого лабораторного эксперимента MID, целью которого было обнаружить дефект в третьем барьере. Стенд имитировал типичную конструкцию скважины с тремя металлическими барьерами: НКТ диаметром 3 1/2", эксплуатационная колонна 9 5/8" и техническая колонна 13 3/8". В третьем барьере лабораторного стенда был сделан дефект – отверстие диаметром 7 1/2", что соответствовало равномерному уменьшению объема металла в 8,8% на 1 фут трубы. По результатам проведенного лабораторного эксперимента 19" сенсора прибора MID дефект был подтвержден в третьем барьере 13 3/8" (см. панель ДЗ ДЕЛЬТА на рисунке 7). Можно видеть, что максимальное отклонение зарегистрированного спада от моделированного произошло в зоне напротив центра дефекта по глубине и пересекает коррозионную линию CL3, определенную по результатам моделирования, что показывает достаточную точность её определения.

По результатам моделирования размер дефекта был оценен как эквивалентное уменьшение объема металла 6,8% на 1 фут, что против исходных данных 8,8% дает погрешность около 2%.

Данный пример показывает, что разработанный алгоритм моделирования дает достаточно надежные расчетные значения уменьшения объема металла, и подтверждает корректность метода определения толщин барьеров.

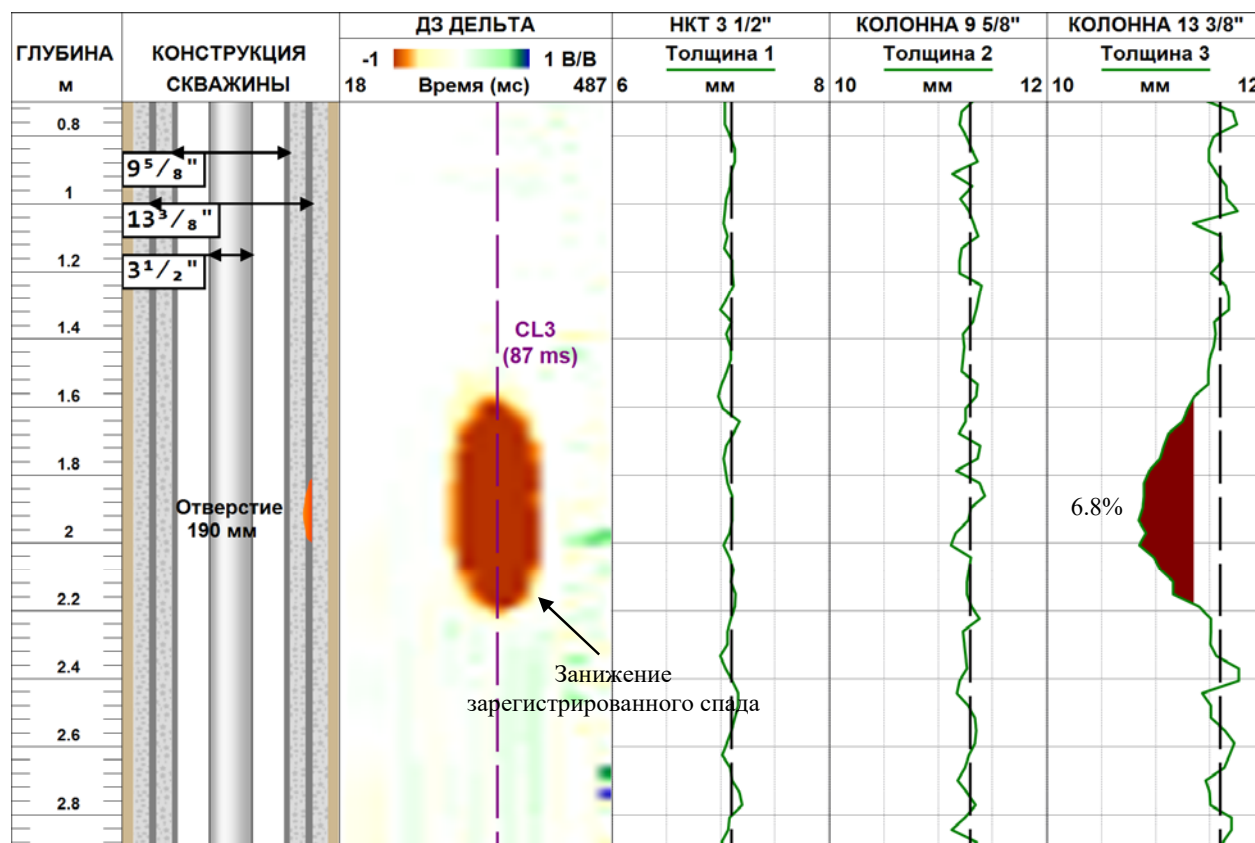


Рисунок 8. Лабораторный эксперимент №1: а. Обнаружение дефекта в третьем барьере (13 3/8"); б. Отсутствие влияния дефекта на расчёты 1-го и 2-го барьеров.

Лабораторный эксперимент №3: Локализация дефекта во втором барьере в 3-х барьерных лабораторных стендах с большими диаметрами труб до 18”

Локализация коррозий во втором и третьем барьерах трехбарьерных скважин, когда диаметры колонн достигают 18”, в течение долгого времени была недоступна. Основными препятствиями являлись значительный радиус исследования, а также высокое значение суммарной толщины стенок колонн.

Данный эксперимент демонстрирует возможности аппаратно-программного комплекса MID для определения толщин барьеров в таких сложных случаях. Лабораторный стенд состоял из трех вставленных в друг друга колонн большого диаметра: 9 5/8”, 13 3/8” и 18”. Во втором барьере (колонне 13 3/8”) было проделано отверстие размером 7 1/2”, что соответствовало удельному (на 1 фут трубы) уменьшению объема металла 8.8%. Замеры осуществлялись 19” зондом прибора MID.

На рисунке 9 показаны результаты такого лабораторного эксперимента. Дефект проявляется на панели Дельта, построенной на основе моделирования данных с 19” зонда и пересекает коррозионную линию третьего барьера, определенной для данного лабораторного стенда. Пересчитанное уменьшение объема металла в зоне дефекта оказалось равной 6.7% на 1 фут трубы. Как и в первых двух лабораторных экспериментах, смоделированное значение уменьшения объема металла практически совпадает с реальным значением. Также можно видеть, что наличие дефекта не сказывается на расчете толщины первого барьера.

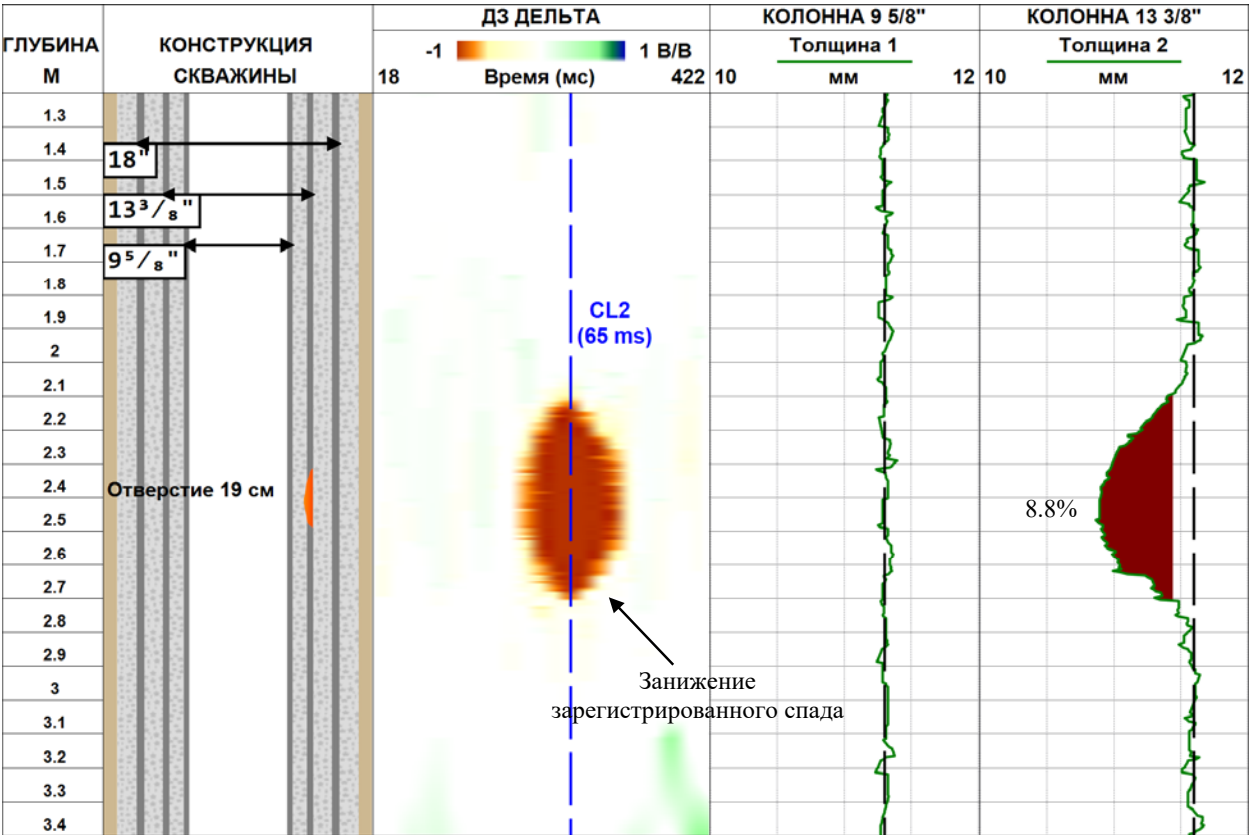


Рисунок 9. Лабораторный эксперимент №2: сканирование на коррозии 3-х барьерных скважин с большими трубами с лабораторным стендом 9 5/8”, 13 3/8” и 18”. Дефект размером 19 см во втором барьере (13 3/8”) проявляется на панели красным пятном. Наличие дефекта не сказывается на расчете толщины первого барьера.

Лабораторный эксперимент №4: Определение мест коррозии в технической колонне в лабораторной стендах с двумя параллельными НКТ

Данный лабораторный эксперимент был специально посвящен проверке работы MID симулятора для расчета толщин третьего барьера в конструкциях скважин с двумя параллельными НКТ. Для этого лабораторный стенд был представлен: двумя внутренними трубками I и II с диаметрами 3 1/2", и внешними трубами с диаметрами 9 5/8" и 13 3/8" соответственно. В третьем барьере был сделан дефект – отверстие диаметром 19 см, что соответствует уменьшению объема металла 8.8% на один фут(см. рисунок 10).

Как ожидалось, дефект, сделанный в 13 3/8", проявляется на ДЗ ДЕЛЬТА и пересекает линию коррозии CL3. Посчитанное уменьшение объема металла оказалось равным 7.1% на 1 фут труб, что вполне согласуется с реальным значением в 8.8% на 1 фут.

Также нужно отметить тот факт, что наличие дефекта в 3-м барьере никак не повлияло на расчет толщин 2 барьера и внутренних НКТ. Это прежде всего свидетельствует о том, что разработанный алгоритм расчета толщин с помощью моделирования работает хорошо даже в случае конструкций скважин со спущенными параллельными НКТ.

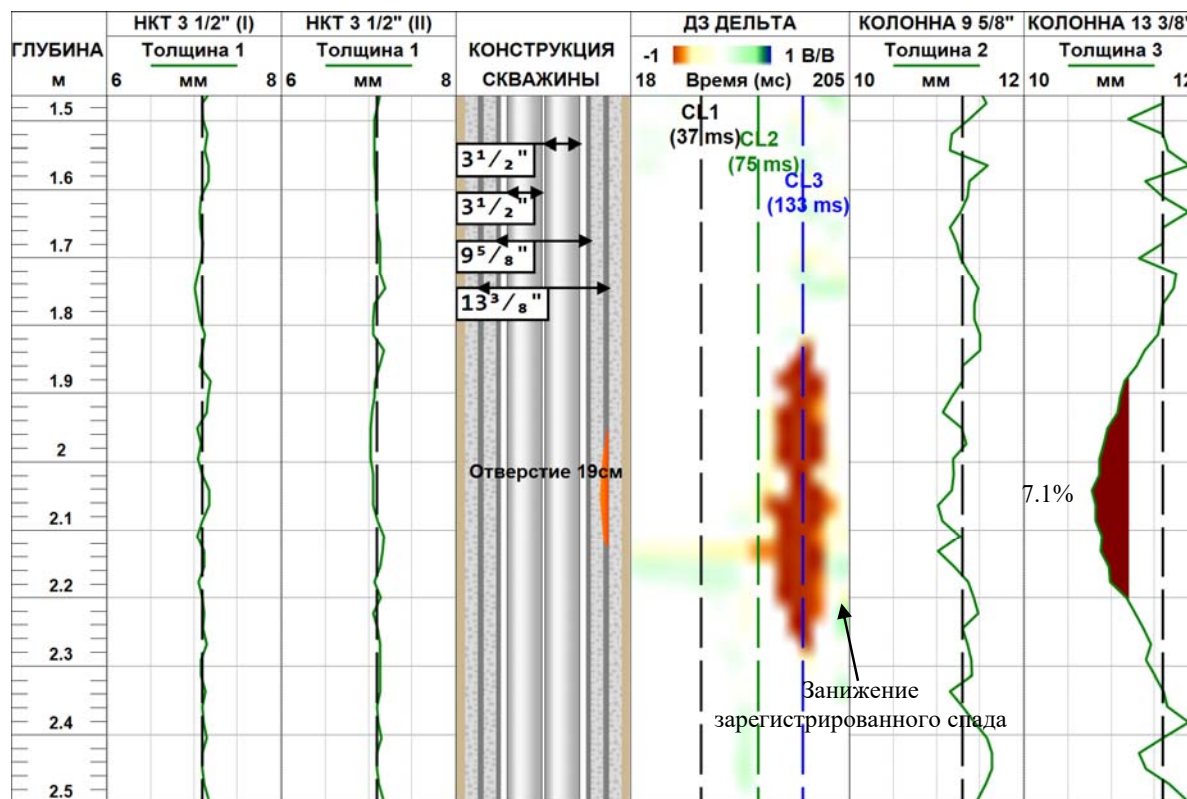


Рисунок 10. Лабораторный эксперимент № 3: а. Дефект размером 7 1/2" обнаружен в 3-м барьере в лабораторном эксперименте с двумя внутренними трубками (3 1/2", 9 5/8" и 13 3/8"); б. Показано, что наличие дефекта в 3-м барьере не влияет на расчёты толщин 1 и 2 барьеров.

Исследование MID в скважинах

В целях демонстрации возможностей трехзондового электромагнитного дефектоскопа (MID) для поиска мест коррозий во втором и третьем барьерах в сложной конструкции скважин со сложной компоновкой, в частности, с двумя параллельными НКТ, приведены результаты замеров с помощью этой методики в трех шельфовых скважинах Персидского залива.

Все скважины описанные в данной статье были переведены в фонд ликвидированных скважин. Исследование MID проводилось с целью определения коррозии во всех колоннах. Эти три скважинных исследования были выбраны таким образом, чтобы охватить наиболее проблемные случаи, возникающие при количественной интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии, а также показать преимущества и определить границы применимости данной методики.

Первое исследование показывает, каким образом определяется степень коррозии соседних колонн в отдельности, например, технической и эксплуатационной, если коррозия происходит одновременно в обеих колоннах и на одной глубине. Второе исследование показывает определение места коррозии в эксплуатационной колонне 9 5/8" через параллельные НКТ, и подтверждение ее при повторном исследовании MID. В последнем исследовании коррозия обнаруженная MID подтверждается комплексом ВЧТ и СНЛ как сквозная.

Исследование MID в скважине WI-01: Локализация и количественная оценка коррозий в соседних колоннах на одной и той же глубине

Нагнетательная скважина WI-01 была пробурена в 1979 году и оснащена компоновкой, предусматривающей раздельную закачку в два основных разрабатываемых пласта. С 2009 года скважина была остановлена по причине появления давления в межтрубном пространстве между технической колонной 13 3/8" и кондуктором 30".

В январе 2014 года тест при опрессовке межтрубных пространств обнаружил уход давления в межтрубном пространстве 9 5/8" x 13 3/8", в том же году было обнаружено проявление нефти объемом 2.6 л/день из затрубного пространства 13 3/8" x 30" на поверхность.

После этого было принято решение о необходимости перевода скважины WI-01 в фонд ликвидированных скважин, что потребовало исследования остаточной толщины эксплуатационной 9 5/8" и технической 13 3/8" колонн. Для решения этой задачи была выбрана методика электромагнитной дефектоскопии (MID). Перед исследованием компоновка труб НКТ была извлечена на поверхность для исследования скважины на предмет качества цементирования колонны 9 5/8", а также для возможных последующих ремонтных работ в скважине перед ее консервацией.

Проведенное в этой скважине исследование MID демонстрирует способность магнитно-импульсной дефектоскопии определять толщины колонн диаметрами 7", 9 5/8" и 13 3/8" за одну спуско-подъемную операцию и выявление в них возможных мест коррозий. Исследование MID проводилось в остановленной скважине со стабильной скоростью 4 метра в минуту во время подъема прибора.

По результатам моделирования замеренных данных MID была построена панель ДЗ ДЕЛЬТА для визуального анализа данных (см. рисунок 11): муфтовые соединения первого 9 5/8" и второго барьеров 13 3/8" представлены синими пятнами, а также коррозия на глубине X297 как красное пятно, пересекающее линии коррозии первого CL1 и второго барьеров CL2. Также с помощью

моделирования были рассчитаны толщины колонн 9 5/8" и 13 3/8", степени коррозии которых оказались равными 14% и 10% соответственно.

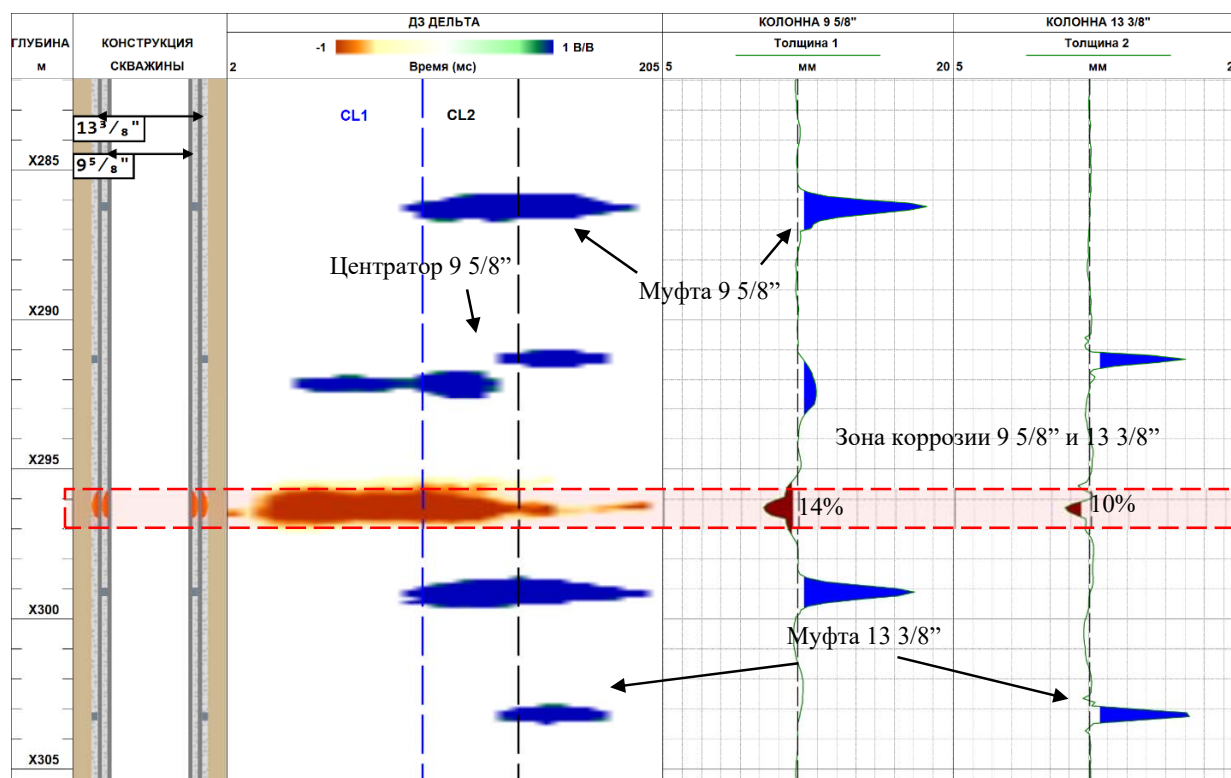


Рисунок 11. Результаты исследования MID в 2-х барьерном случае: коррозии обнаружены в технической 13 3/8" и эксплуатационной 9 5/8" колоннах на одной глубине (красное пятно на панели ДЗ ДЕЛЬТА), степень коррозии каждой их колонн определена независимо.

Исследование MID в скважине WI-02: Локализация коррозии в эксплуатационной колонне 9 5/8" через параллельные НКТ и их подтверждение после извлечения НКТ

Данное исследование демонстрирует возможности методики электромагнитной дефектоскопии с использованием анализа спадов намагниченности во временной области для поиска и обнаружения мест коррозии в эксплуатационной колонне в скважине, оснащенной двумя параллельными трубами НКТ.

Скважина WI-02 была пробурена в 1978 году и обсажена в 1983 году скважинной компоновкой для раздельного нагнетания в два основных разрабатываемых объекта месторождения. В 2014 году было решено перевести скважину в фонд ликвидированных скважин по причине сильной коррозии кондуктора 30" в нескольких десятках метров от поверхности. Минимальная толщина стенки кондуктора составляла всего 5,7 мм против номинальной толщины 12,7 мм. Наличие зон негерметичности колонн было также обнаружено по снижению давления затрубного пространства 9 5/8" x 13 3/8" при его опрессовке.

Одной из основных задач при ликвидации скважины ставилась оценка толщины колонн 9 5/8" и 13 3/8", для чего был использован аппаратно-программный комплекс MID.

Исследование MID было запланировано провести дважды: через компоновку параллельных НКТ и

без них, для верификации достоверности выявленных коррозий с помощью прибора MID в колоннах 9 5/8" и 13 3/8".

Первое исследование было проведено в каждой из двух НКТ, при этом эксплуатационная колонна 9 5/8" исследовалась как второй металлический барьер.

Повторное исследование MID было проведено после того, как трубки НКТ были извлечены из скважины, и в данном исследовании колонна 9 5/8" служила первым барьером, где коррозию обнаружить становится значительно проще. Таким образом, повторное было исследование запланировано для подтверждения результатов исследований первого.

Результаты первого замера приведены на рисунке 12. С помощью MID симулятора были построены панели КЗ ДЕЛЬТА и ДЗ ДЕЛЬТА для короткого 5" и длинного 19" сенсоров соответственно, а также кривые толщин для всех труб в скважине.

На рисунке 12 представлены замеры через короткую НКТ (I), так как результаты через длинную НКТ (II) получились похожими. На панели толщины короткого сенсора мест коррозий труб в интервале исследования не было обнаружено.

На панели длинного 19" сенсора ДЗ ДЕЛЬТА на глубине X247 метров проявляется красное пятно, обозначенное как коррозия в колонне 9 5/8", поскольку это пятно пересекает линию коррозии для второго барьера CL2 на панели ДЗ ДЕЛЬТА. Отклонение толщины колонны 9 5/8" от номинальной составило 15%. Согласно визуальному анализу панели ДЗ ДЕЛЬТА и толщины колонны 13 3/8", было сделано заключение, что коррозий в технической колонне не обнаружено.

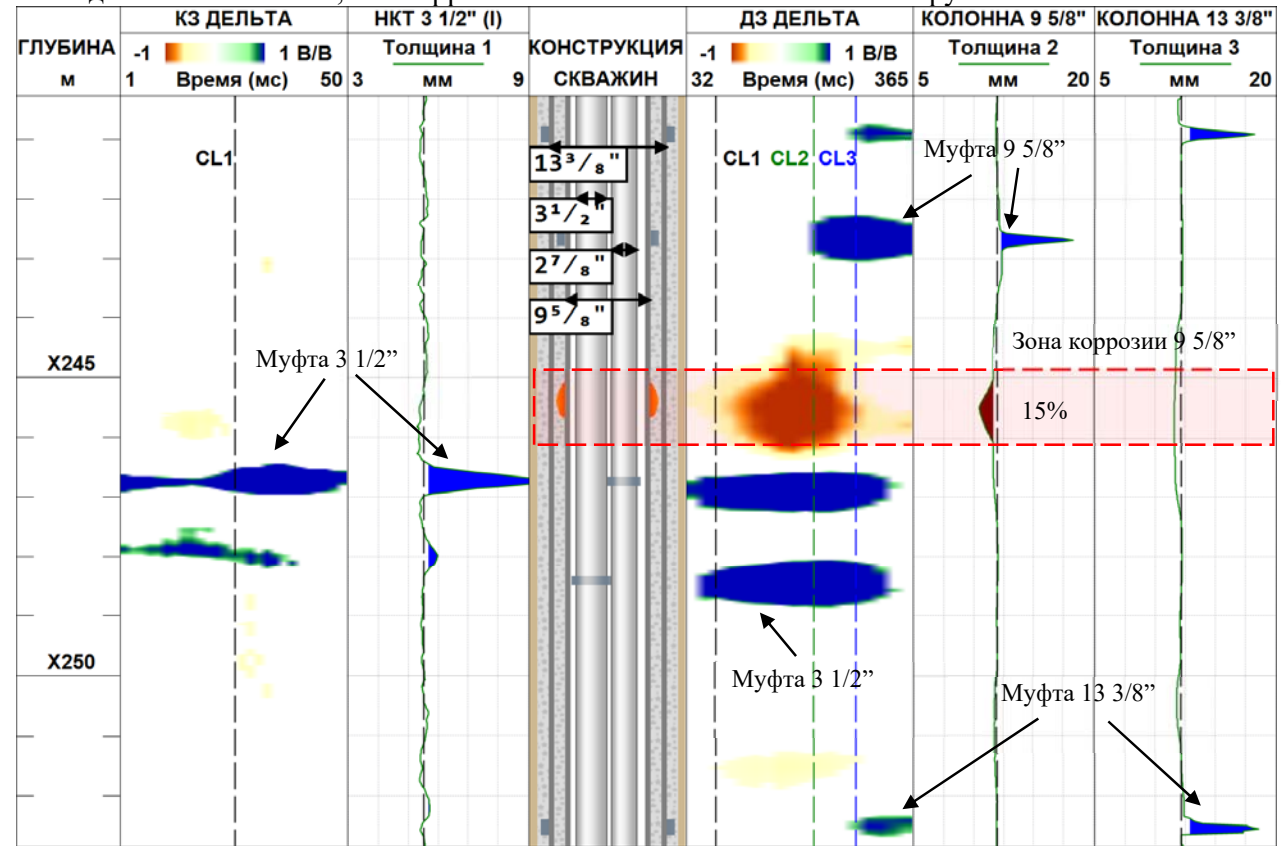


Рисунок 12. Результаты исследования MID до извлечения НКТ: обнаружены все муфтовые соединения исследуемых колонн и труб НКТ; была обнаружена коррозия в колонне 9 5/8".

Результаты повторного исследования MID, после извлечения труб НКТ на поверхность, приведены на рисунке 13. Коррозия колонны 9 5/8” подтвердилась на глубине X247 метров – характерное красное пятно на панели ДЗ ДЕЛЬТА пересекает линию коррозии CL1. Поскольку в повторном эксперименте колонна 9 5/8” была первым барьером, то логично, что на панели ДЗ ДЕЛЬТА соответствующее ей красное пятно пересекала коррозионная линия, рассчитанная для первого барьера. Уменьшение объема металла от номинального значения колонны 9 5/8” составило 13% на 1 фут, что хорошо соотносится со значением 15%, полученным в первом исследовании MID.

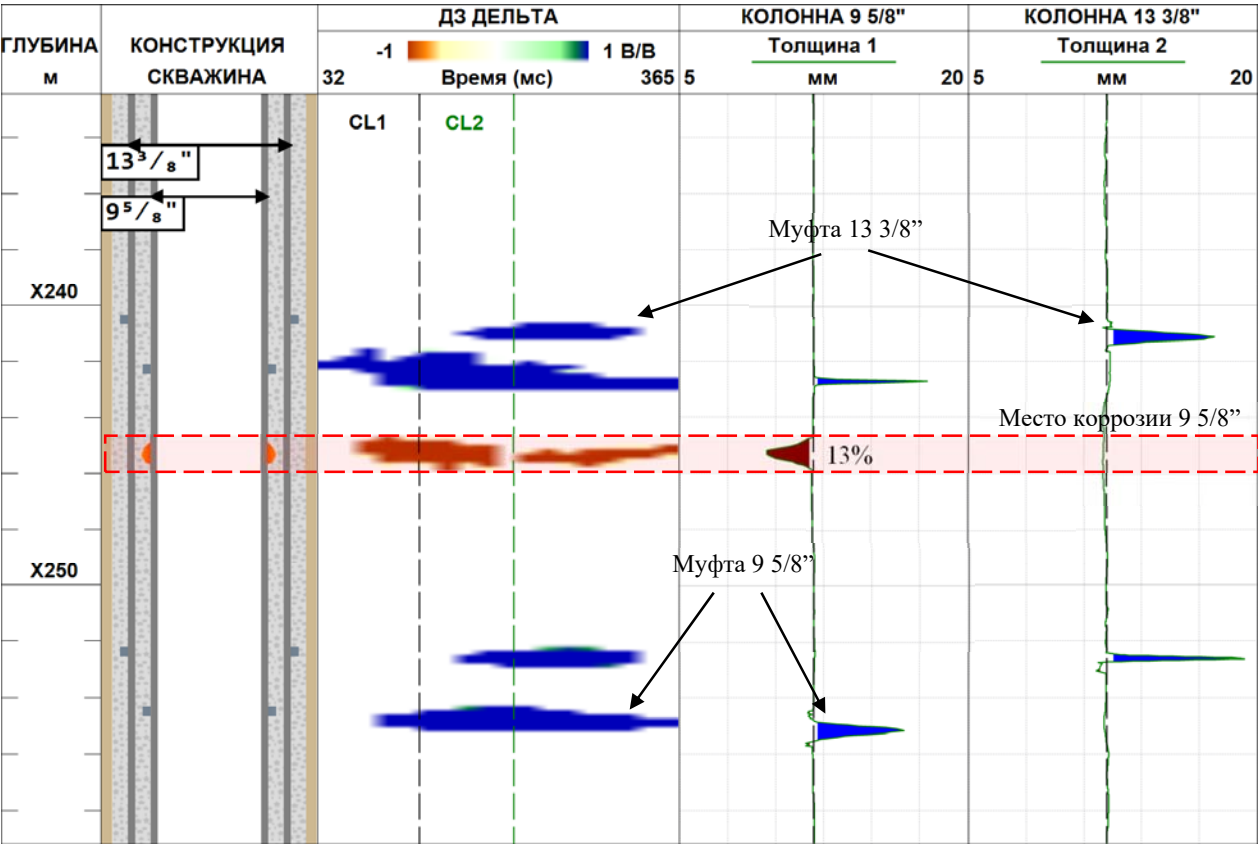


Рисунок 13. Результаты исследования MID после извлечения НКТ: коррозия колонны 9 5/8” подтвердилась.

На рисунке 14 приведен сравнительный анализ первого и повторного исследования MID. Видно, что исследования MID до и после извлечения труб НКТ коррелируют друг с другом выявлена и подтверждена коррозия в эксплуатационной колонне 9 5/8”, согласуются также определенные по MID симулятору значения степени коррозии. Это показывает эффективность аппаратно-программного комплекса MID для оценки степени коррозии колонн в конструкциях скважин, оснащенных двумя параллельными НКТ.

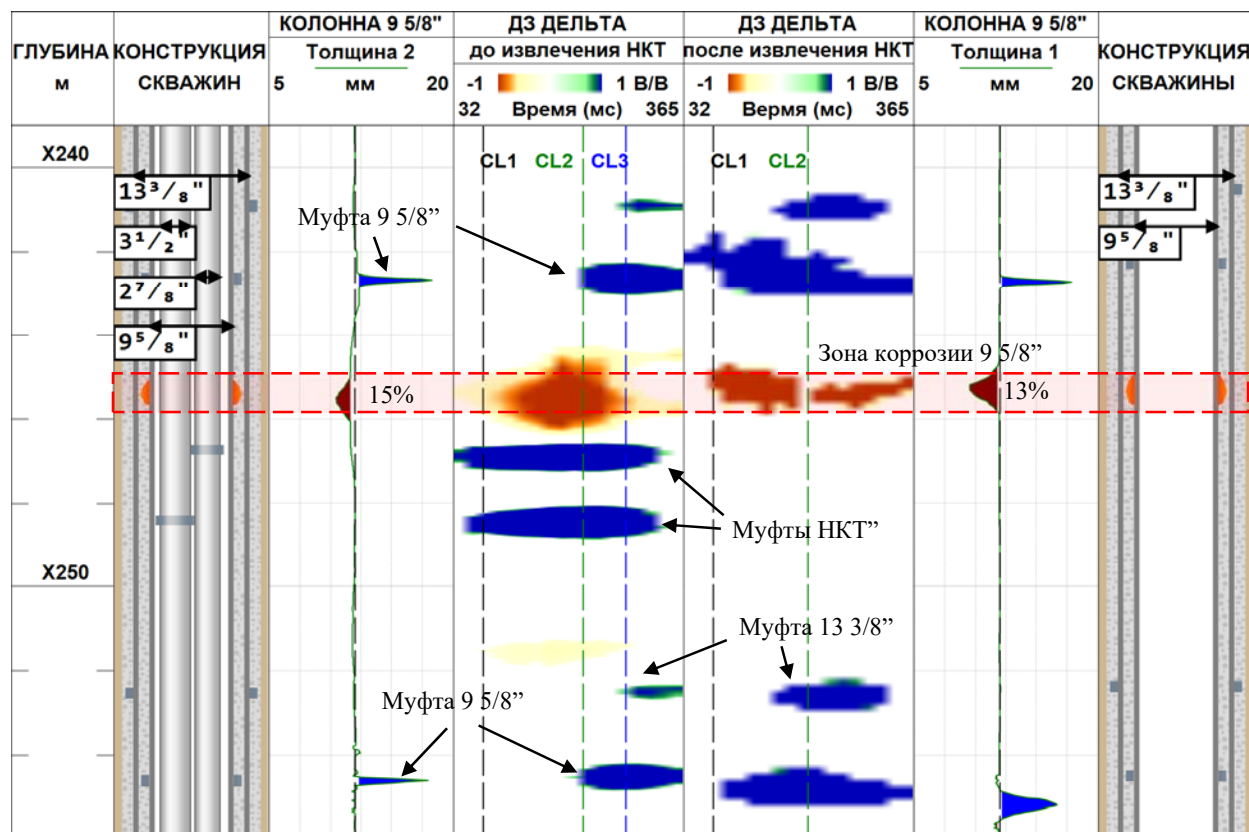


Рисунок 14. Сравнительный анализ результатов исследований MID: коррозия 9 5/8", обнаруженная до извлечения труб НКТ, подтвердилась в повторном исследовании.

Исследование в скважине WI-03: Поиск мест сквозной коррозии интегрированным комплексом MID, высокочувствительной термометрией и спектральной шумометрии

Скважина WI-03 была пробурена в 1978 году и была оснащена двумя параллельными НКТ для раздельного нагнетания в два разрабатываемых пласта. В 2014 году скважину было решено перевести в фонд ликвидированных скважин по причинам значительной коррозии кондуктора 30" и колонны 13 3/8", а также падения давления во время опрессовки в 1400 кПа. Перед ликвидацией скважины необходимо оценить остаточные толщины колонн 7", 9 5/8", 13 3/8", а также ликвидировать возможные перетоки и утечки.

В 2014 году в ходе опрессовки в 1400 кПа межтрубного 7" x 10 3/4" обнаружилось падение давления и выход закачиваемой жидкости через межтрубное 10 3/4" x 13 3/8". Перечисленные выше факты свидетельствуют о наличии сообщения между межтрубьями через техническую колонну 10 3/4". Так как выход закачиваемой жидкости через межтрубье 10 3/4" x 13 3/8" наблюдался через 15 минут с момента начала нагнетания, то сообщение предполагалось на незначительной глубине. Помимо указанных трех колонн (7", 10 3/4" и 13 3/8") верхняя часть скважины также оснащена направлением 18".

Ввиду наличия сообщения между межтрубными пространствами 7" x 10 3/4" и 10 3/4" x 13 3/8" было принято решение провести комплексное исследование MID, ВЧТ и СНЛ во время закачки в межтрубье 7" x 10 3/4" и открытом межтрубном пространстве 10 3/4" x 13 3/8" в режиме

циркуляции. Основной задачей такого исследования является поиск мест нарушений и коррозии в 10 3/4", а также оценка остаточной толщины первых трех колонн 7", 10 3/4", 13 3/8".

Результаты исследования MID представлены на рисунке 15. Были обнаружены два участка коррозии в колоннах 10 3/4" и 13 3/8" на глубине X013 метров, которые на панели ДЗ ДЕЛЬТА наблюдаются как контрастное коричневое пятно, пересекающее две линии коррозии CL1 и CL2, вычисленные для первого и второго барьера данной конструкции скважины. Рассчитанные с помощью MID симулятора толщины колонн 10 3/4" и 13 3/8" приведены в колонках КОЛОННА 7", КОЛОННА 10 3/4" и КОЛОННА 13 3/8": степень коррозии этих колонн составила 50% и 14%, соответственно. Следует отметить, что в отличие от методов с использованием палеток для расчета толщины стенок колонн, симуляции позволяют однозначно отличить случай коррозии в двух соседних колоннах от сильной коррозии в одной из колонн.

Результаты комплекса ВЧТ и СНЛ представлены в 3-х последних колонках рисунка 15. В районе обнаруженного с помощью MID дефекта наблюдается температурная аномалия. Синим цветом показана температура в момент нагнетание воды в затрубное пространство 10 3/4" и 13 3/8", а красным в остановленной скважине. В этом же интервале наблюдается низкочастотный, протяженный по глубине шум, характерный для движения потока воды по заколонному пространству. Таким образом, по совокупности данных MID, ВЧТ и СНЛ можем говорить о наличии сквозной коррозии в колонне 10 3/4".

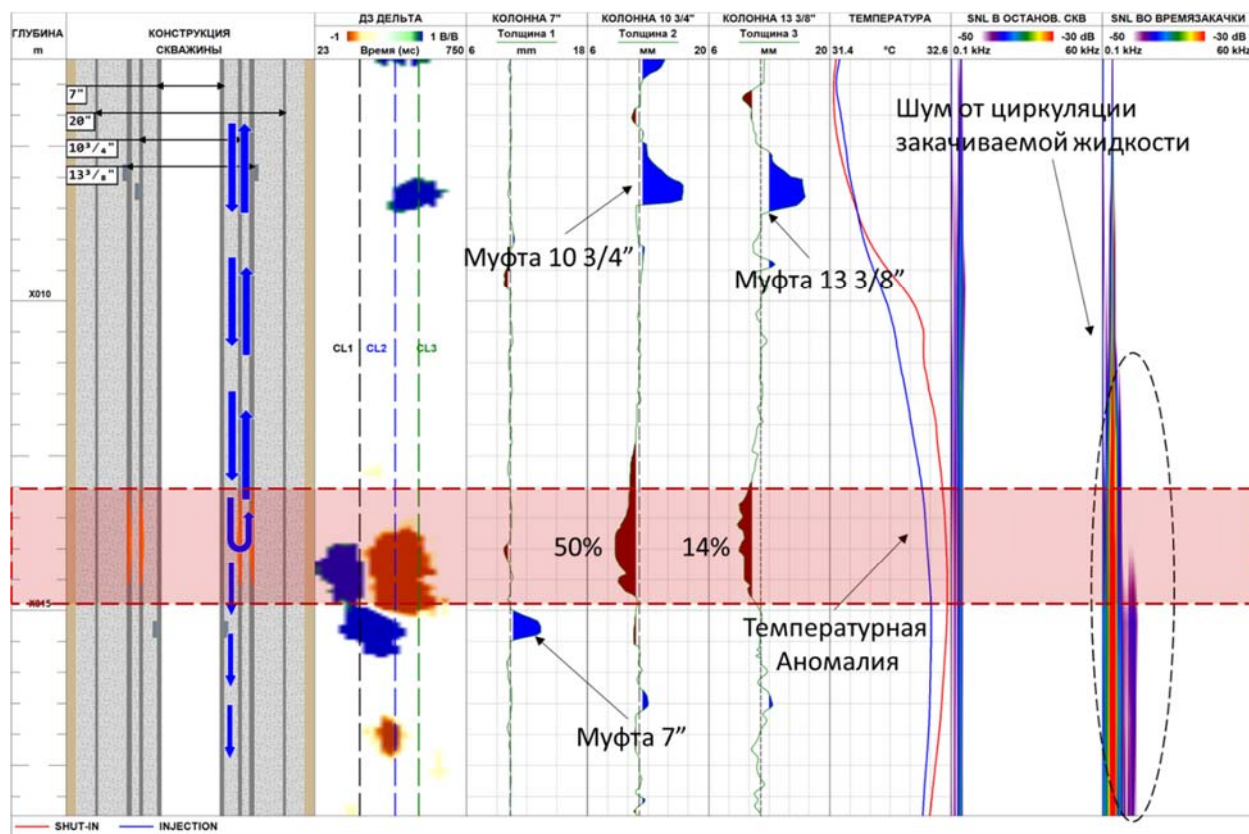


Рисунок 15. Применение комплекса магнитно-импульсной дефектоскопии, высокочувствительной термометрии и спектральной шумометрии для выявления зон сквозных коррозий. Значительная коррозия, выявленная в 10 3/4" является сквозной, что подтверждается комплексом ВЧТ и СНЛ. Использование моделирования позволило выявить незначительную коррозию 13 3/8" на той же глубине

Заключение

Данная статья демонстрирует возможности аппаратно-программного комплекса MID для сканирования первых трех колонн с целью определения:

1. Толщины каждой колонны
2. Металлических свойств каждой колонны
3. Степени коррозии в компоновках с двумя параллельными НКТ
4. Зон децентрации НКТ относительно колонны

Условные обозначения

ВЧТ	Высокочувствительная температура
СНЛ	Спектральная шумометрия
MID	Магнитно-импульсная дефектоскопия
ZADCO	Zakum Development Company
CL1	Линия коррозии 1
CL2	Линия коррозии 2

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность компании Zakum Development Company (ZADCO) за их разрешение публикации результатов исследования, а также Мохаммеду Шештави и Булату Загидуллину за их ценные замечания и участие в создании материала статьи.

Ссылки

Aslanyan, A.M, Aslanyan, I.Y, Arbuzov, A.A, Zagidullin, B., Al-Rahawi, T.A., Prosvirkin, S., Al-Ajmi, M.F., Awad, M.O., Sharma, S.S., Das, M. 2014. Time-Domain Magnetic Defectoscopy for Tubing and Casing Corrosion Detection. SPE International Oilfield Corrosion Conference and Exhibition, Aberdeen, Scotland, 12-13 May.

Claudio Castaneda, Josue Higuera, Fernando Portela, Marcia Benavides, Dirk Valstar, Shuvo Barnejee 2014. Corrosion Monitoring With EM Induction Tool in 3 Outer Casing Strings through a 7 Inch Chrome Production Tubing Scenario. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 25-26 March.

Donald C. Vogtsberger, Bruce Girrell, Jerry Miller, Douglas Spencer 2005. Development of High-Resolution Axial Flux Leakage Casing Inspection Tools, SPE Eastern Regional Meeting, Morgantown, West Virginia, 14-16 Sep.

Ghalem Salim, Serry Amr Mohamed, Al-felasi Ali, Berrim Ahmed, Keshtta Osama Mohamed, Filenev Maxim, Draoui Elyes, Mohamed Ayman, Abu Chaker Hicham, Gabdrakhmanova Alfiya, Aslanyan Arthur 2012. Innovative Logging Tool Using Noise Log and High Precision Temperature Help to Diagnoses Complex Problems. Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 11-14 Nov.

Hans-Emil Bensnes Torbergsen, Hilde Brandanger Haga, Sigbjørn Sangesland, Bernt Sigve Aadnøy, Jan Sæby, Ståle Johnsen, Marvin Rausand, Mary Ann Lundeteigen 2012. An Introduction to Well Integrity.

Khalil, I.N., Filinev, M., Aslanyan A.M., Aslanyan I.,Y., Barghouti, J.,El-Hamawi, M.H, AL-Hassan, R.,A., Salim B. 2012. Leak detection by temperature and noise logging, Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 11-14 Nov.

Maxted, L., Sondex, L., Hazel, P. 1995. Advances in Multi-Finger Caliper Technology and Data Acquisition. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 5 Jan.

Shagalin R.R, Antipin Yu.V. 2012. Life cycle analysis for vertical wells at arlan deposit

Under different conditions of use. The electronic scientific journal “Oil and Gas Business” №3

Thilo Michael Brill, Jean-Luc Le Calvez, Cindy Demichel, Edward Nichols, Fernando Zapata Bermudez 2011. Quantitative Corrosion Assessment with an EM Casing Inspection Tool. SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 15-18 May.