

УДК 550.832.75:622.245.1

*А. П. Потапов, В. Н. Даниленко, Л. Г. Леготин, Р. Р. Куйбышев,
Д. В. Крюков, А. А. Ахмадеев, С. Ф. Смирнов
АО НПФ «ГИТАС», ООО НПФ АМК «ГОРИЗОНТ»*

МАГНИТОИМПУЛЬСНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ И ТОЛЩИНОМЕТРИЯ ОБСАДНЫХ КОЛОНН АВТОНОМНЫМИ ПРИБОРАМИ НА ТРУБАХ МИД-АМК «ГОРИЗОНТ»

Описан способ азимутального и радиального зондирования стенки обсадных колонн скважины. Показаны возможности модуля МИД-АМК «Горизонт» на моделях и в реальных скважинах.

Ключевые слова: горизонтальные скважины, обсадные колонны, электромагнитная дефектоскопия, азимутальное зондирование, толщинометрия.

Введение

Техническое состояние эксплуатационной и нагнетательной скважин определяет их долговечность как сооружений, предназначенных для долговременной эксплуатации. Актуальной задачей контроля технического состояния является выявление мест нарушений обсадной колонны, установление причин их возникновения. Как правило, сжатие или разрыв колонн может происходить через 10–15 лет после ввода скважины в эксплуатацию.

Повреждения преимущественно связаны с коррозией металла при контакте с соленой пластовой водой и с сероводородом, содержащимся в нефти. Механический износ стенки обсадной колонны часто связан со спуско-подъемными работами бурильного инструмента или насосно-компрессорных труб (НКТ). Нарушения могут возникнуть также при воздействии со стороны породы, превышающем запас прочности обсадной колонны при отсутствии цементного кольца.

В настоящее время для оценки технического состояния обсадных колонн наклонно-направленных и горизонтальных скважин (ГС) применяются автономные геофизические приборы – гамма-гамма-цементомеры, например АГГЦ, СГДТ-110А и др. Наряду с оценкой качества цементирования приборы позволяют определять толщину стенки колонны в диапазоне 5–12 мм, могут доставляться в ГС с

помощью НКТ или бурового инструмента. К ограничениям метода можно отнести интегральные характеристики механического и коррозионного износа стенки обсадной колонны.

К ограничениям акустических методов исследования обсадных колонн приборами типа САТ можно отнести влияние на исследования наличия в растворе шлама, газовой фазы, отложений на внутренней стенке колонны. Для обеспечения качества результатов необходимо подготавливать скважину, что усложняет работы по контролю технического состояния колонн.

Автономные малогабаритные дефектоскопы-толщинометры (МИД АМН) разработаны для исследований на проволоке вертикальных скважин. Эти приборы включают два интегральных зонда, что не позволяет проводить азимутальное зондирование колонны.

Дефектоскоп с азимутальным и радиальным разрешением

При выборе методов электромагнитной дефектоскопии и толщинометрии в горизонтальных скважинах для автономных приборов на трубах должны учитываться следующие характеристики:

- отсутствие выносных датчиков регистрации электромагнитного поля;
- определение толщины стенки первой и второй колонн;
- азимутальное сканирование стенки колонны.

АО НПФ «ГИТАС» получило патенты на способ электромагнитной дефектоскопии и электромагнитный дефектоскоп [1–5], которые являются основой для разработки магнитоимпульсного дефектоскопа обсадных колонн горизонтальных скважин, позволяющего осуществить азимутальное и радиальное сканирование колонн. Ниже приведен принцип работы дефектоскопа-толщинометра.

В цилиндрической системе координат расположена колонна, ось которой совпадает с осью Z (рис. 1). По оси Z расположен зонд, который включает генераторный и совмещенный с ним измерительный соленоид длиной L с центром в точке $Z = 0$, $r = 0$ (интегральные измерения). В первичных преобразователях электромагнитного поля 2, расположенных на расстоянии r от оси прибора на плоскости $Z = 0$, магнитный момент направлен перпендикулярно оси соленоидов (азимутальные измерения). Импульс тока длительностью τ пропускается через генераторный соленоид. В момент времени $t \leq \tau$ в колоннах

создается первичное магнитное поле H_0 , а при $t > \tau$ регистрируется ЭДС вторичного магнитного поля, созданного вихревыми токами в колонне. ЭДС компоненты H_z^z вторичного магнитного поля как функции времени $\varepsilon_z(t)$ регистрируется соленоидом на оси прибора, а ЭДС компоненты H_r^z вторичного поля $\varepsilon_r(t)$ регистрируется первичными преобразователями магнитного поля, расположенными по периметру зонда прибора.

Если цилиндрические границы оси координат совпадают с коаксиальными границами колонны, то имеем $\varepsilon_r(t) = 0$, а если границы колонны содержат разрыв, то $\varepsilon_r(t) \neq 0$.

Разрешение прибора зависит от размеров и количества датчиков регистрации $\varepsilon_r(t)$ и расстояния от датчика до колонны.

Для обеспечения оптимального разрешения зондов в диапазоне диаметров первых колонн от 114 до 178 мм предложено использовать модуль с тремя диаметрами зондов – 73, 105 и 136 мм. На рис. 2 приведен общий вид приборов. По кривым спада $\varepsilon_z(t)$ вычисляется толщина стенки.

Для обработки и интерпретации результатов измерений аппаратурой МИД-АМК «Горизонт» разработано программное обеспечение DeViz-АМК «Горизонт». Для вычисления толщины проведены расчеты кривых спада переходного процесса для заданных параметров: толщины стенки S и диаметра колонны D , магнитной проницаемости стали μ , удельной электропроводности σ для различных диаметров прибора. Кривые сохраняются в базе данных.

Определение толщины стенки колонны проводится на основе алгоритма поиска теоретической кривой спада (КС) с использованием базы данных для параметров μ , σ , S , минимально расходящейся с фактической кривой КС. Определяется минимум функционала:

$$\Phi = \min \sum_{j=1}^M \left(\frac{\varepsilon_z(t) - Y(t)}{Y(t)} \right),$$

где $Y(t)$ – теоретическая КС; $\varepsilon_z(t)$ – фактическая КС.

Каждый изготовленный прибор проходит проверку на аттестованных моделях в метрологическом центре. На моделях толщины стенок труб оцениваются калибровочные характеристики прибора, а на моделях, имитирующих локальные дефекты различной формы и потери металла, определяют разрешение прибора.

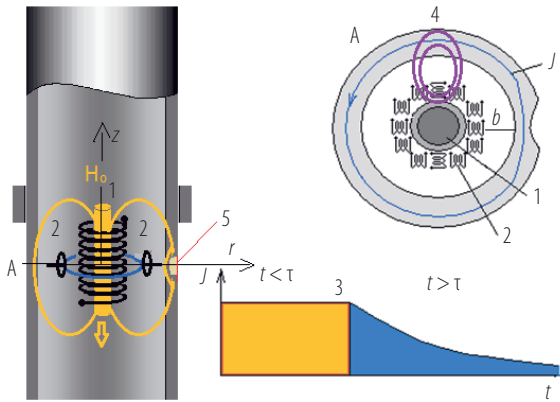


Рис. 1. Принцип работы зонда МИД-АМК «Горизонт»: 1 – генераторный соленоид; 2 – азимутальные датчики; 3 – J – плотность тока от времени; 4 – диаграмма направленности; 5 – разрыв цилиндрической границы

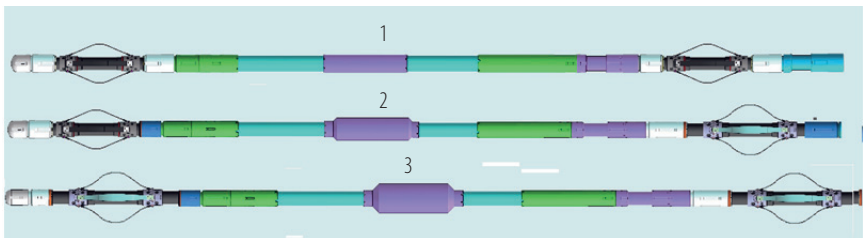


Рис. 2. Общий вид зондов МИД-АМК «Горизонт»: 1 – $d = 73 \text{ мм}$; 2 – $d = 105 \text{ мм}$; 3 – $d = 136 \text{ мм}$

На рис. 3 приведены примеры расчета толщины стенки аттестованных моделей диаметрами 146 и 245 мм, где $L_2 - L_{10}$ – кривые интегральных измерений; 1 – толщина модели; 2 – результат определения толщины. Максимальное расхождение толщины для модели $D = 245 \text{ мм}$ – $\delta S = 0,45 \text{ мм}$; $\Phi = 0,02$; $\mu = 18,3$; $\sigma = 3 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, а для трубы $D = 146 \text{ мм}$ – $\delta S = 0,55 \text{ мм}$; $\Phi = 0,015$; $\mu = 23,2$; $\sigma = 3 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ при толщине стенки 2,2 мм, что выходит за пределы динамического диапазона метода (минимальная толщина стенки труб определяется с заданной погрешностью 3 мм).

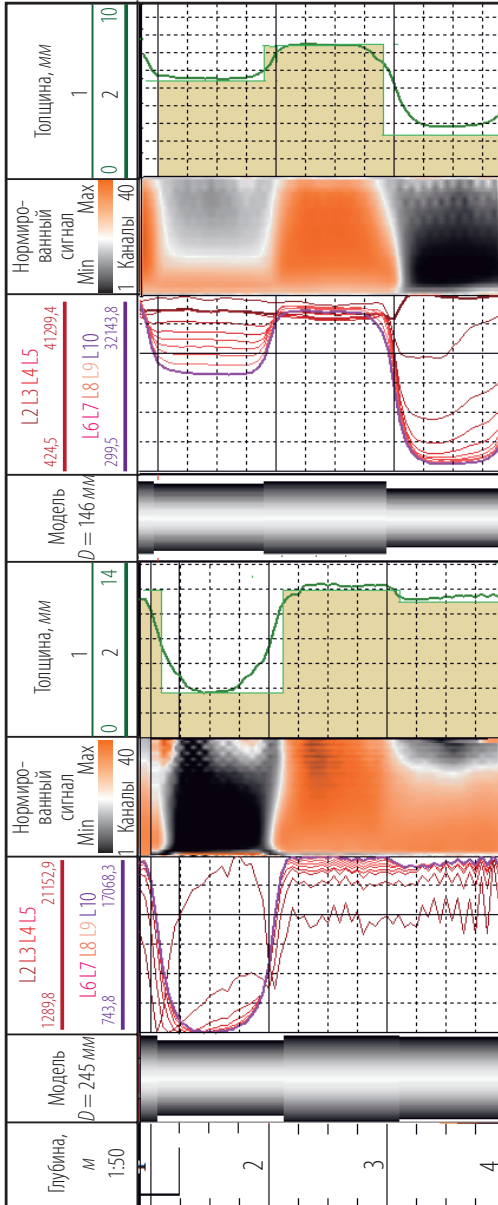


Рис. 3. Определение толщины стенки в одноколпонных моделях

На рис. 4 представлены результаты измерений и вычисления толщины стенки труб для двухколонной модели. Первая труба – диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм; вторая труба – диаметром 245 мм с толщиной стенки 3,8, 11,85 и 11 мм. Максимальное расхождение для первой колонны – не более $\delta S = 0,5$ мм; для второй – $\delta S = 0,53$ мм; $\Phi = 0,034$; $\mu_1 = 17,38$; $\mu_2 = 27$; $\sigma_{1,2} = 3 \cdot 10^6$ См/м.

Пример на рис. 5 показывает, как можно оценить азимутальное разрешение зонда. Измерения проводились зондом диаметром 105 мм в трубе диаметром 146 мм с пропилами, имитирующими продольную и поперечную трещины размером 70×2 и 230×2 мм соответственно. На рис. 5 $R = \partial \epsilon_r / \partial z$; числа 1–12 – номера азимутальных датчиков, расположенных по периметру; число 7 – номер временного канала (поздние времена затухания для азимутальных датчиков). Существенны аномалии против продольной щели (1) на 5-м и 6-м датчиках. Для поперечной щели (2) аномалии наблюдаются с 1-го по 6-й датчик, половина из всех, что соответствует размеру поперечной щели и равна 1/2 периметра трубы.

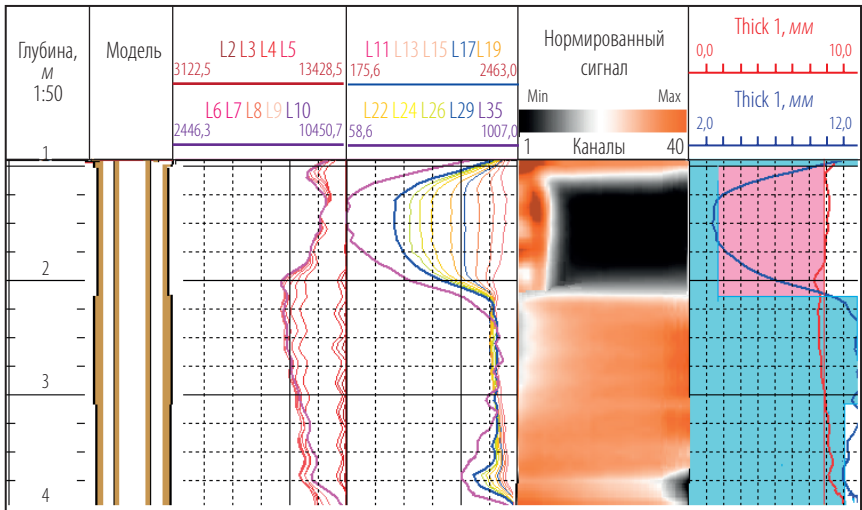


Рис. 4. Определение толщины стенки в двухколонной модели

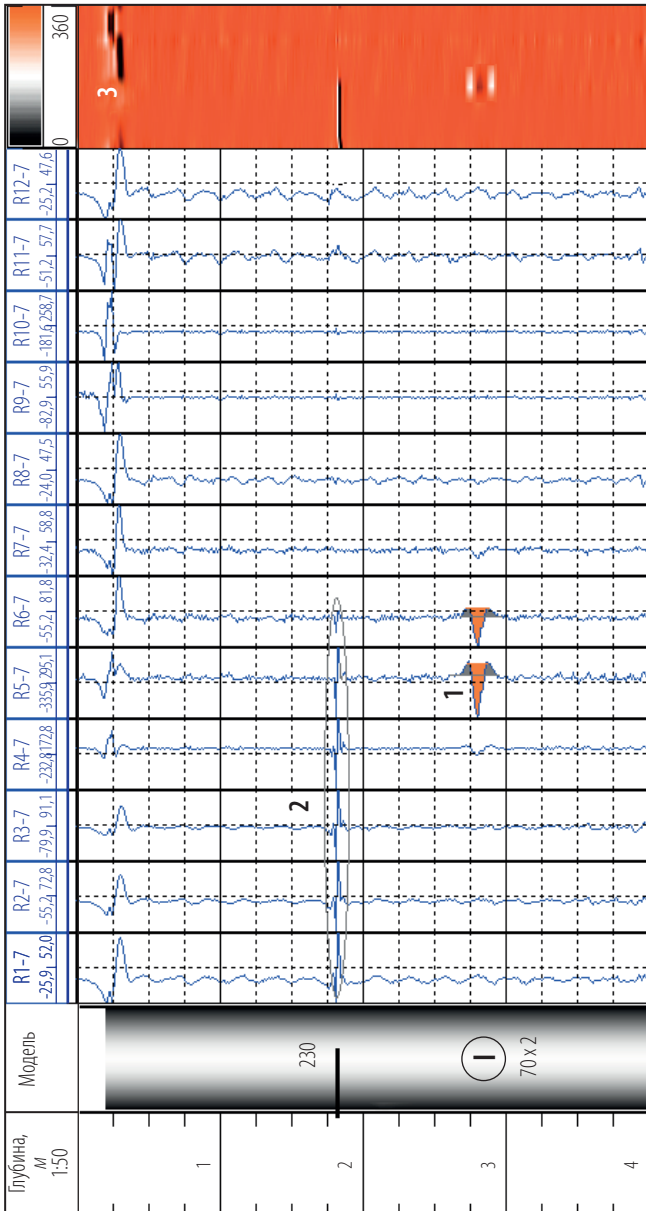


Рис. 5. Пример азимутальных измерений. Цифрами обозначено: 1 – аномалии против продольной щели; 2 – аномалии для поперечной щели; 3 – трехмерное представление $\epsilon_r - R(z, \varphi, \partial \epsilon_r / \partial z)$

На рис. 6 приведены кривые спада на пятом датчике с 1-го по 8-й временной канал. Для продольной трещины аномалии отмечаются начиная с ранних времен переходного процесса и достигают максимального значения на 6-м временном канале; на поздних временах амплитудные аномалии уменьшаются (дефект электрического типа). Для поперечной трещины аномалии начинаются на средних временах (5-й канал) и амплитуда увеличивается на поздних временах (дефект магнитного типа).

На рис. 7 приведены результаты определения локальных дефектов в виде отверстий разных диаметров от 12 до 50 мм, углублений на внутренней поверхности стенки трубы диаметром от 12 до 50 мм (номер дефекта 19, 28), поперечных сквозных трещин (8, 12). Диаметр трубы – 146 мм, толщина стенки – 8 мм. Описание модели дано в табл. 1. Минимальный размер отверстия, которое достаточно надежно выявляется, равен 12 мм, а углубление составляет 30 мм с потерей металла 60 и 40% (21, 22). Трещины (8, 12) длиной 70 и 130 мм определяются как отрицательные аномалии: чем длиннее трещины, тем больше аномалия.

Таблица 1

Описание модели № 34

| № дефекта | Расстояние от верхнего торца, м | Диаметр отверстия, мм | № дефекта | Размер локального дефекта | |
|-----------|---------------------------------|-----------------------|-----------|---------------------------|-------------|
| | | | | Диаметр, мм | Глубина, мм |
| 1 | 0,61 | 50 | 19 | 50 | 5 |
| 2 | 0,81 | 50 | 20 | 50 | 3 |
| 3 | 1,01 | 50 | | | |
| 4 | 1,21 | 30 | 21 | 30 | 5 |
| 5 | 1,41 | 30 | 22 | 30 | 3 |
| 6 | 1,61 | 30 | | 30 | 3 |
| 7 | 1,81 | 15 | 23 | 15 | 3 |
| 8 | 1,88 | | 8 | 1 × 70 | 8 |
| 9 | 2,01 | 15 | 24 | 15 | 5 |
| 10 | 2,21 | 15 | | | |
| 11 | 2,41 | 15 | 25 | 15 | 5 |
| 12 | 2,56 | | 12 | 1 × 130 | 8 |
| 13 | 2,71 | 12 | 26 | 12 | 3 |
| 14 | 2,91 | 12 | 27 | 12 | 5 |
| 15 | 3,105 | 12 | 28 | 12 | 5 |

В настоящее время комплекс МИД-АМК «Горизонт», включающий модули с диаметрами зондов 73, 105 и 136 мм, широко используется при оценке технического состояния обсадных колонн в ГС и позволяет решать следующие задачи:

- определение остаточной толщины обсадной и технической колонн;
- уточнение конструкции скважин;
- определение местоположения центрирующих фонарей, пакеров;
- выявление потенциально опасных интервалов, подверженных сильной коррозии;
- диагностика сквозных нарушений колонны;
- выбор оптимальных интервалов для забуривания боковых стволов;
- уточнение интервалов перфорации.

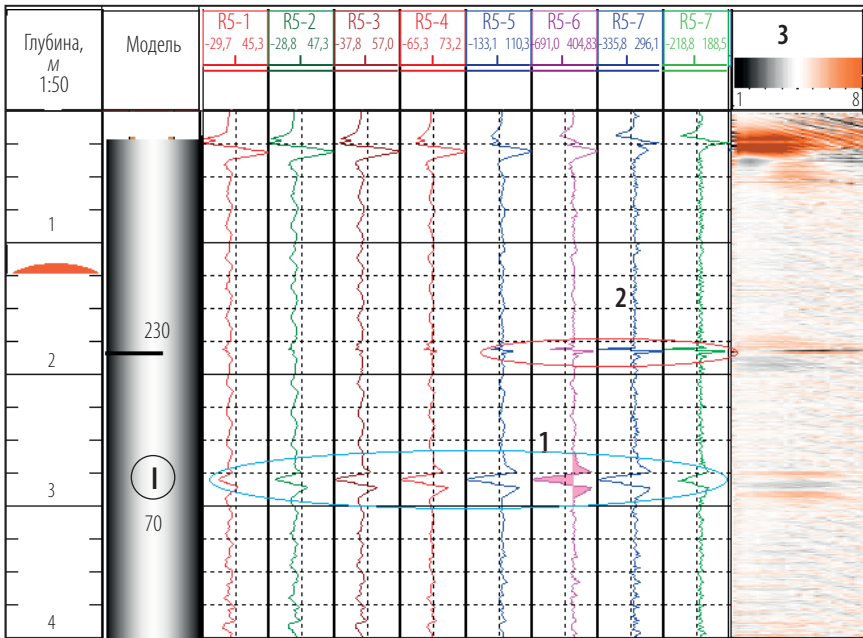


Рис. 6. Пример радиальных измерений. Условные обозначения см. на рис. 5

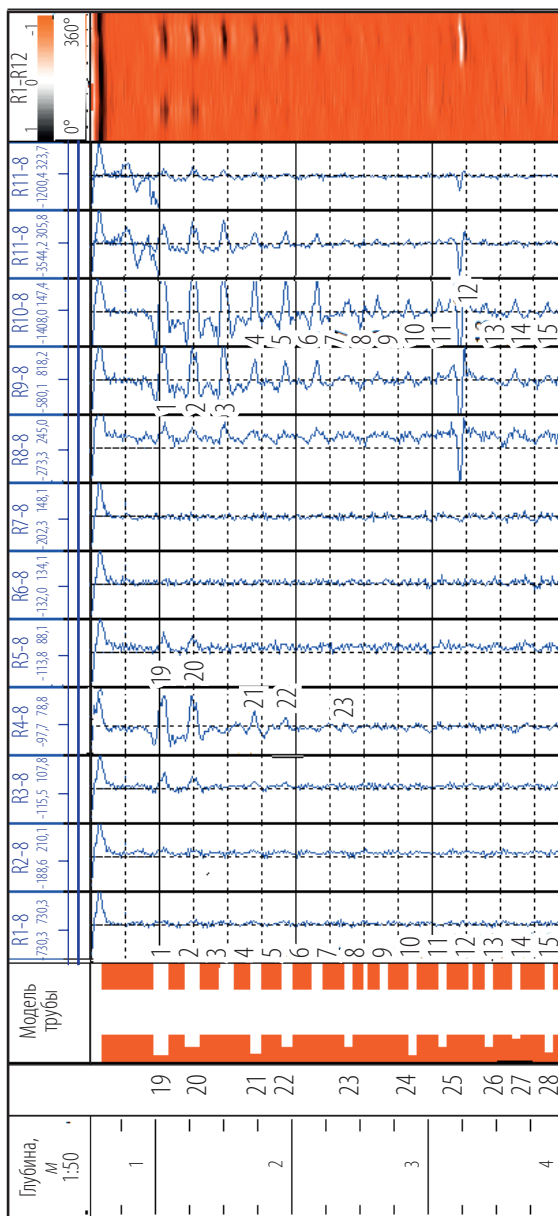


Рис. 7. Результаты определения локальных дефектов (цифрами обозначены номера дефектов из табл. 1)

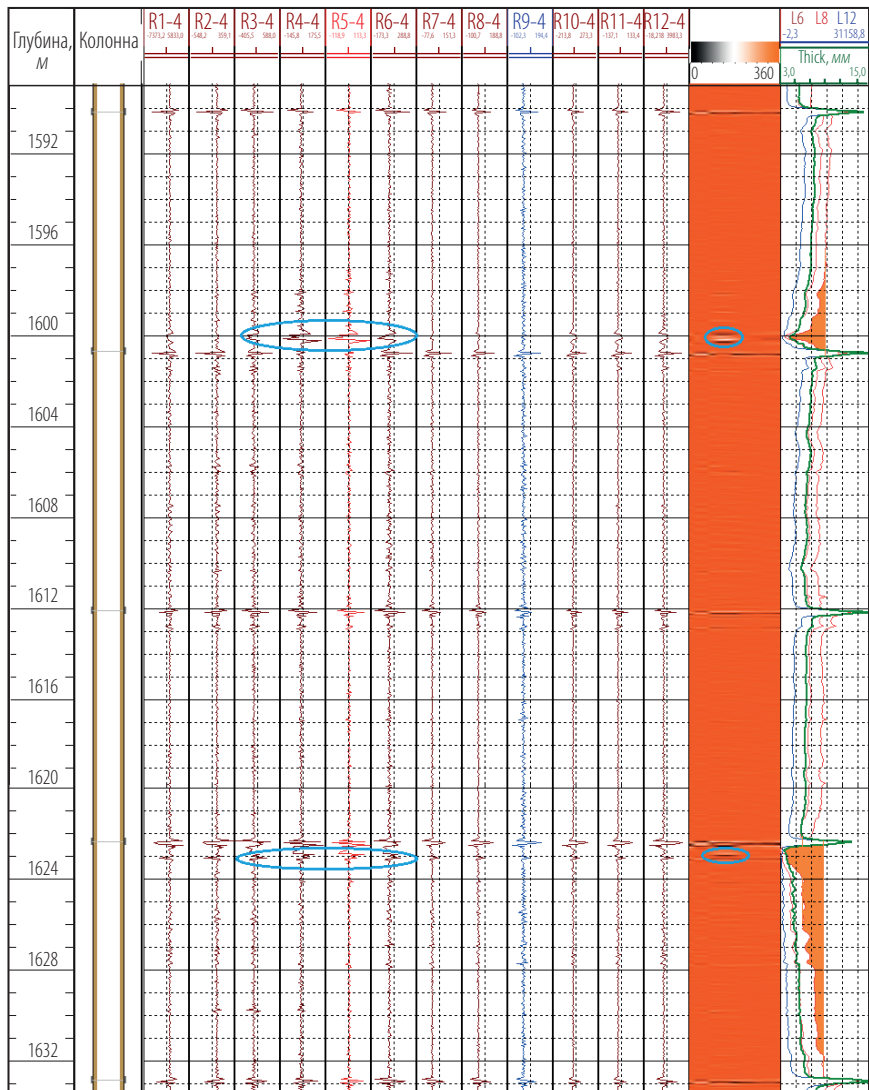


Рис. 8. Пример исследования горизонтальных скважин

Пример определения толщины (Thick) эксплуатационной колонны (ЭК) в ГС, нарушения целостности стенки колонны на глубине 1600 и 1622,5 м и интервала сильной коррозии (1626–1628 м) приведен на рис. 8. Сквозной дефект и коррозия дают аномалии как на интегральных (L6, L8, L12), так и на сканирующих датчиках (R1–R12).

В табл. 2 приведены результаты определения минимальной толщины в каждой трубе ЭК. Желтым цветом обозначены интервалы, где отклонение минимальной толщины, связанное с коррозией, превышает стандарт на точность изготовления труб по ГОСТ 632-80. Красным цветом обозначены трубы, где коррозия классифицируется как нарушение, а потеря металла с учетом погрешности определения толщины составляет более 50%.

Прибор МИД-АМК «Горизонт» с июля 2019 г. находится в промышленной эксплуатации. На сегодняшний день выполнено 64 исследования скважин, из них три – в Казахстане, остальные – на объектах ПАО «Газпром»: Ковыктинском ГКМ, Таб-Яхинском участке Уренгойского НГКМ, Харасавэйском ГКМ, Бованенковском НГКМ.

Таблица 2

Результаты расчета минимальной толщины труб ЭК

| № трубы | Нарастающая глубина, м | Длина трубы, м | Мин. толщина, мм | Отклонение от номинала | Примечания |
|---------|------------------------|----------------|------------------|------------------------|------------|
| 28 | 1281,57 | 10,15 | 7,37 | -0,37 | |
| 29 | 1291,72 | 10,15 | 6,97 | 0,03 | |
| 30 | 1302,32 | 10,60 | 6,82 | 0,18 | |
| 31 | 1312,07 | 9,75 | 6,86 | 0,14 | |
| 32 | 1322,57 | 10,50 | 6,10 | 0,90 | Коррозия |
| 33 | 1333,62 | 11,05 | 7,07 | -0,07 | |
| 34 | 1344,47 | 10,85 | 6,70 | 0,30 | |
| 35 | 1354,97 | 10,50 | 5,65 | 0,36 | |
| 36 | 1364,62 | 9,65 | 7,43 | -0,43 | |
| 37 | 1374,92 | 10,30 | 7,37 | -0,37 | |
| 38 | 1385,32 | 10,40 | 5,41 | 0,59 | |

Таблица 2 (окончание)

| | | | | | |
|----|---------|-------|------|-------|-----------|
| 39 | 1395,97 | 10,65 | 6,34 | 0,66 | |
| 40 | 1406,82 | 10,85 | 7,18 | -0,18 | |
| 41 | 1417,17 | 10,35 | 6,27 | 0,74 | |
| 42 | 1426,37 | 9,20 | 6,66 | 0,34 | |
| 43 | 1437,27 | 10,90 | 7,42 | -0,42 | |
| 44 | 1445,87 | 8,60 | 7,06 | -0,06 | |
| 45 | 1456,07 | 10,20 | 7,38 | -0,38 | |
| 46 | 1467,12 | 11,05 | 6,45 | 0,55 | |
| 47 | 1477,77 | 10,65 | 4,76 | 1,24 | |
| 48 | 1486,67 | 8,90 | 6,53 | 0,47 | |
| 49 | 1497,77 | 11,10 | 6,60 | 0,41 | |
| 50 | 1508,47 | 10,70 | 5,35 | 1,65 | Коррозия |
| 51 | 1518,37 | 9,90 | 6,90 | 0,10 | |
| 52 | 1528,42 | 10,05 | 6,05 | 0,95 | Коррозия |
| 53 | 1538,57 | 10,15 | 6,19 | 0,81 | |
| 54 | 1549,32 | 10,75 | 5,97 | 1,03 | Коррозия |
| 55 | 1558,82 | 9,50 | 5,31 | 1,70 | Коррозия |
| 56 | 1569,42 | 10,60 | 5,90 | 1,11 | Коррозия |
| 57 | 1580,07 | 10,65 | 5,44 | 1,56 | Коррозия |
| 58 | 1590,17 | 10,10 | 5,45 | 1,55 | Коррозия |
| 59 | 1600,72 | 10,55 | 4,21 | 2,79 | Нарушение |
| 60 | 1612,12 | 11,40 | 5,75 | 1,25 | Коррозия |
| 61 | 1622,37 | 10,25 | 5,74 | 1,26 | Коррозия |
| 62 | 1632,87 | 10,50 | 3,43 | 3,58 | Нарушение |
| 63 | 1644,37 | 11,50 | 5,74 | 1,26 | Коррозия |
| 64 | 1654,62 | 10,25 | 5,83 | 1,18 | Коррозия |
| 65 | 1665,77 | 11,15 | 6,89 | 0,11 | |

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2364719 № 2007142168.03 РФ. Способ электромагнитной дефектоскопии в многоколонных скважинах / А. Н. Наянзин, А. П. Потапов, ЗАО НПФ «ГИТАС». Заявл. 14.11.2007; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23.
2. Патент 2372478 № 2008113923/03 РФ. Электромагнитный скважинный дефектоскоп / А. Н. Наянзин, А. П. Потапов, ЗАО НПФ «ГИТАС». Заявл. 29.04.2008; опубл. 10.11.2009. Бюл. № 31.
3. Патент 2250372 № 2003124913/03 РФ. Электромагнитный скважинный дефектоскоп / В. И. Шамшин, В. Н. Даниленко, А. Н. Наянзин, В. В. Даниленко, ЗАО НПФ «ГИТАС». Заявл. 8.08.2003; опубл. 20.04.2005.
4. Патент 2636064 № 2016128899 РФ. Способ электромагнитной дефектоскопии в многоколонных скважинах / А. П. Потапов. Заявл. 14.07.2016; опубл. 20.11.2017.
5. Патент 138022 № 2013139156 РФ. Электромагнитный скважинный дефектоскоп / А. П. Потапов, В. Н. Даниленко, Р. Р. Куйбышев, ЗАО НПФ «ГИТАС». Заявл. 27.08.2013; опубл. 27.02.2014.

Рецензент канд. техн. наук М. Я. Гельфгат