

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

УДК 550.832.75:622.245.1

А.П. Потапов, к.т.н., АО «НПФ «ГИТАС» (Октябрьский, РФ), a.potapov@gitas.ru

В.Г. Умедбаев, д.т.н., проф., Уфимский государственный нефтегазовый технический университет (Уфа, Республика Башкортостан, РФ)

Магнитоимпульсная дефектоскопия является эффективным средством контроля технического состояния многоколонных нефтегазодобывающих скважин как в процессе бурения, так и при их капитальном ремонте. Данные расчетов толщины используются для оценки остаточной прочности обсадных колонн на глубине до 3000 м.

Метод магнитоимпульсной дефектоскопии развивается в двух направлениях, таких как развитие теории, аппаратуры и методики интерпретации, позволяющих решать задачи оценки технического состояния третьей и четвертой обсадных колонн, а также повышение разрешающей способности за счет использования сканирующих зондов, включая комплексирование с механическими профиломерами, акустическими сканерами. В статье рассматривается пример комплексирования «классической» зондовой аппаратуры с микропрофиломерным оборудованием, получившим в последние годы распространение на российском рынке.

Одним из основных факторов, влияющих на качество результатов интерпретации, является использование математической модели, адекватной реальным измерениям. В статье предложен алгоритм численного моделирования измерений магнитоимпульсного дефектоскопа в многоколонных скважинах, описана технология интерпретации данных магнитоимпульсной дефектоскопии на основе компьютерного анализа теоретически рассчитанных и измеренных кривых спада.

Алгоритм определения толщины стенки колонн, локальных дефектов, интервалов коррозии основан на компьютерном анализе кривых спада переходного процесса, рассчитанных на основе математического моделирования, а также полученных по результатам предыдущих измерений (за весь период существования метода) по реперным интервалам. Приведены результаты исследования в многоколонных скважинах. Оценена возможность комплексирования магнитоимпульсной дефектоскопии и механической профилометрии. Подтверждена эффективность комплексирования на математических моделях и на реальном скважинном материале.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** МНОГОКОЛОННАЯ СКВАЖИНА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА, КРИВАЯ СПАДА, МАГНИТОИМПУЛЬСНАЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИЯ, ПРОФИЛОМЕТРИЯ, КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ.

Магнитоимпульсные дефектоскопы (МИД) являются эффективным средством контроля технического состояния скважин. В отличие от акустических, радиоактивных и механических приборов они исключают влияние на измерения немагнитных отложений на внутренней поверхности стенки трубы и плотных образований за колонной. МИД применяются для предотвращения возможных аварийных ситуаций в процессе бурения и при капитальном ремонте скважин, используются для выделения интервалов перфорации, границ врезов и элементов конструкции, дефектов ко-

лонны, позволяют осуществлять контроль щелевой гидроструйной перфорации. Данные расчетов толщины используются для оценки остаточной прочности обсадных колонн.

Метод МИД основан на регистрации нестационарных электромагнитных полей, что позволяет при одной геометрии зонда исследовать трубы различных диаметров от 60 до 460 мм как в одноколонной, так и в многоколонной компоновке [1].

Технические характеристики аппаратуры определяются длительностью импульсов тока, проходящих через генераторные катушки,

временем регистрации вихревых токов, наведенных в трубах. Точность оценки потери металла в трубах зависит от используемого алгоритма вычисления остаточной толщины стенки колонн.

Развитие метода идет в основном в двух направлениях, в числе которых:

- создание аппаратуры и методики интерпретации, позволяющих решать задачи оценки технического состояния 3-й и 4-й обсадных колонн большого диаметра;
- повышение разрешающей способности метода за счет использования сканирующих зон-

**Potapov A.P.**, Candidate of Sciences (Engineering), Scientific and Production Firm GITAS JSC (Oktyabrsky, Russian Federation), a.potapov@gitas.ru

**Umedbaev V.G.**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

### New opportunities of magnetic pulse non-destructive testing

Magnetic pulse non-destructive testing is an effective method for controlling the technical state of the multi-string oil and gas producing wells both during drilling and capital repair. Thickness estimated data is used for the assessment of the residual strength of casing strings at a depth of 3,000 m.

The development of the magnetic pulse non-destructive testing method has principally two directions. First of all, the development of the theory, hardware and interpretation method which allow solving matters in assessment of the technical state of the third and fourth casing strings. Secondly, increasing the resolution capacity of the method by using scanning probes, including complexation with mechanic geometry tools and acoustic scanners. The article reviews an example of the complexation of the classical probe hardware with micro profile logging equipment which has been used in the Russian market over the last years.

One of the main factors influencing the quality of interpretation results is the use of a mathematical model which is adequate to real measurements. The article proposes an algorithm of numerical modeling of the measurements of a magnetic pulse detector in multi-string wells and describes the technology of data interpretation for the magnetic pulse non-destructive testing based on the computer analysis of theoretically calculated and measured drop-down curves.

The thickness calculation algorithm for strings, local defects and corrosion intervals is based on the computer analysis of the transient process drop-down curves calculated by mathematical modeling and obtained from the previous measurements (for the whole period of the method existence) at reference intervals. The research results in multi-string wells are demonstrated. The possibility of the complexation of magnetic pulse non-destructive testing and mechanic profile logging is assessed. The efficiency of complexation performed at mathematical models and at a real bore-hole material is confirmed.

**KEYWORDS:** MULTI-STRING WELL, MATHEMATICAL MODELING, INVERSE PROBLEM, DROP-DOWN CURVE, MAGNETIC PULSE NON-DESTRUCTIVE TESTING, PROFILE LOGGING, COMPLEXATION.

дов, включая комплексирование с механическими профилемерами, акустическими имиджерами.

«Классическая» аппаратура МИД-К (МИД-Газпром) включает осевой зонд (Z) и два поперечных зонда (X, Y) [2]. В новых модификациях аппаратуры есть три осевых зонда и 6–12 радиальных приемных катушек с временным разделением сигнала от исследуемых колонн, что позволяет существенно повысить достоверность оценки технического состояния насосно-компрессорной трубы (НКТ), скважинных фильтров и обсадных колонн, в том числе третьей и четвертой [3].

Одним из основных факторов, влияющих на качество результатов интерпретации, является использование математической модели, адекватной реальным измерениям.

Рассмотрим задачу численного моделирования измерений зондом толщиномером в следующей постановке. На оси симметрии кусочно-однородной среды с  $N$  коаксиально-цилиндрическими поверхностями раздела на рас-

стоянии  $L$  друг от друга расположены генераторная и измерительная катушки. Необходимо определить электродвижущую силу (ЭДС) переходных процессов в точке расположения измерительной катушки.

Учитывая осевую симметрию задачи, воспользуемся цилиндрической системой координат  $r, \phi, z$ . Начало координат совместим с генераторной катушкой, рассмотрим ее как магнитный диполь с моментом  $(\vec{M}_z^i = M \vec{e}_z$ , ось  $z$  направим вдоль оси симметрии. Обозначим координаты цилиндрических границ  $r_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ), электромагнитные параметры  $i$ -й среды, ограниченной поверхностями  $r_{i-1}, r_i$ , соответственно,  $\sigma_i, \varepsilon_i, \mu_i$ , где  $\sigma_i$  – проводимость,  $\varepsilon_i$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\mu_i$  – относительная магнитная проницаемость среды,  $k_i^2 = \mu_i \omega^2 \varepsilon_i + i \mu_i \omega \sigma_i$  – квадрат волнового числа,  $\omega$  – циклическая частота.

Для определения характеристик нестационарного процесса воспользуемся спектральным подходом, основанным на применении интеграла Фурье.

При возбуждении поля ступенчатой функцией тока:

$$J(t) = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $J$  – амплитуда тока;  $t$  – время.

Имеем:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{i\omega} d\omega, \quad (2)$$

где  $h(t)$  – частотная характеристика электромагнитного поля магнитного диполя на оси скважины, выраженная в единицах поля в воздухе;  $h(t)$  – временная характеристика электромагнитного поля;  $i$  – мнимая единица.

Поле, возбуждаемое магнитным диполем на оси скважины, будет осесимметричным, т. е. отсутствовать зависимость от угла  $\phi$ .

Поле разбивается на две независимые системы:

$$H_r = \frac{1}{\omega \mu} \frac{\partial E_\phi}{\partial z}, \quad H_z = -\frac{1}{\omega \mu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi), \quad (3)$$

где  $E_\phi$  – электрическая составляющая электромагнитного поля, которая удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\phi) + \frac{\partial^2 E_\phi}{\partial z^2} + k^2 E_\phi \right] = -i\omega j, \quad (4)$$

где  $k = k(r) = \sqrt{i\omega\mu\sigma(r)}$ ,  $j$  – компонента стороннего тока.

Применив синус-преобразование Фурье, получим:

$$E_\phi = \int_0^\infty F(\lambda r) \cos \lambda z d\lambda, \quad (5)$$

где  $F(\lambda r)$  – функция, которая удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rF(\lambda r)) \right] - (\lambda^2 - k^2)F(\lambda r) = 0$$

при  $r \neq 0$ . (6)

Уравнение (6) при  $0 < r < r_1$  имеет общее решение:

$$F(\lambda r) = A(\lambda)K_1(\lambda r) + B(\lambda)I_1(\lambda r), \quad (7)$$

где  $K_1(\lambda r)$ ,  $I_1(\lambda r)$  – модифицированные функции Бесселя – Макдональда;  $A(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  – некоторые функции параметра  $\lambda$ , которые определяются из граничных условий.

Используя условия возбуждения электромагнитного поля, получим [2]:

$$F(\lambda r) = \frac{i\omega\mu\lambda_1}{2\pi^2} (-K_1(\lambda r) + C(\lambda)I_1(\lambda r)), \quad (8)$$

где  $m$  – момент диполя;  $C(\lambda)$  – неизвестная функция;  $\lambda_1 = \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}$ .

Введем вместо функции  $F(\lambda r)$  новую функцию:

$$Y(r) = \frac{\mu_i}{r^2} \frac{d}{d\lambda} [rF(\lambda r)], \quad (9)$$

которая согласно (6) должна удовлетворять уравнению Риккати:

$$Y^1(r) + Y^2(r) = \frac{\lambda^2 - k^2}{r}. \quad (10)$$

Подставляя (8) в (9), получим:

$$C(\lambda) = C_1 = \frac{r_1 Y_1 \mu_1 K_1(\lambda_1 r_1) + \lambda K_0(\lambda_1 r_1)}{r_1 Y_1 \mu_1 I_1(\lambda_1 r_1) - \lambda I_0(\lambda - k^2)}.$$

$Y_1$  определим из уравнения Риккати (10).

Для кусочно-гладкой среды уравнение (10) имеет аналитическое решение.

$$Y(r) = Y_i = \frac{\lambda_{r+1}}{r_i \mu_{i+1}} x \times \frac{K_0(\lambda_{i+1} \cdot r_i) - C_{i+1}(\lambda) \cdot I_0(\lambda_{i+1} \cdot r_i)}{K_1(\lambda_{i+1} \cdot r_i) - C_{i+1}(\lambda) \cdot I_1(\lambda_{i+1} \cdot r_i)}, \quad (11)$$

$$C_i = \frac{\lambda_i K_0(\lambda_i r_i) + Y_i K_1(\lambda_i r_i) r_i \mu_i}{\lambda_i I_0(\lambda_i r_i) + Y_i K_1(\lambda_i r_i) r_i \mu_i}, \quad (12)$$

$$Y_{N-1} = -\frac{\lambda_N K_0(\lambda_N r_{N-1})}{\mu_N r_{N-1} K_1(\lambda_N r_{N-1})}, \quad (13)$$

где  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $K_0$ ,  $K_1$  – модифицированные функции Бесселя от комплексного аргумента,  $\lambda_1 = \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}$ .

Из выражений (3) получим окончательные формулы для расчета  $z$  и  $r$  компонент магнитного поля:

$$h_z(\omega) = h_z^0(k_1, L) - \frac{L^3}{\pi} \int_0^\infty \lambda_1 C_1 I_0(\lambda m) \cos \lambda L dm, \quad (14)$$

$$h_r(\omega) = h_r^0(k_1, L) - \frac{L^3}{\pi} \int_0^\infty \lambda_1 m C_1 I_1(\lambda m) \sin \lambda L dm, \quad (15)$$

$h_z^0(k_0, L)$ ,  $h_r^0(k_0, L)$ ,  $z$  и  $r$  – компоненты электромагнитного поля в однородной среде с удельной проводимостью  $\sigma_1$ ;  $\lambda_1 = \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}$ ;  $C_1$  – определяется из рекуррентных формул (11–13);  $L$  – длина зонда;  $I_0(\lambda m)$  – функция Бесселя [2].

Для расчета становления поля при любом числе цилиндрических поверхностей раздела необходимо провести численное интегрирование выражений (14), (15).

Для вычисления воспользуемся методом линейной фильтрации, который позволит избежать сложностей, связанных с интегрированием осциллирующих функций. Расчет бесселевых функций проводился отдельно для малых и больших значений аргумента. В интервале  $|\lambda r_i|$  от 0 до 6 расчет осуществлялся по формуле степенных рядов, обеспечивающих точность  $10^{-7}$  до  $|\lambda r_i| \leq 6$ , а при  $|\lambda r_i| > 6$  использовалось разложение по полиномам Чебышева.

При больших значениях аргумента, как было показано в [2], чтобы избежать потери точности при большом числе слоев, целесообразно преобразовать формулы (11–13). Введем новую величину  $S_i = C_i e^{-2m_i r_{i+1}}$ , тогда

$$Y_{i-1} = -\frac{m_i}{r_{i-1} \mu_i} x \times \frac{K_0(m_i r_{i-1}) e^{m_i r_{i-1}} - S_i I_0(m_i r_{i-1}) e^{-m_i r_{i-1}}}{K_1(m_i r_{i-1}) e^{m_i r_{i-1}} - S_i I_1(m_i r_{i-1}) e^{-m_i r_{i-1}}}. \quad (16)$$

При расчете  $Y_{i-1}$  используется разложение функций Бесселя по полиномам Чебышева:

$$I_0(x) e^{-x}, I_1(x) e^{-x}, K_0(x) e^{-x}, K_1(x) e^{-x}. \quad (17)$$

При интегрировании выражения (10) необходимо исключить особую точку при  $\omega = 0$ . Введем комплексную частоту  $\omega = \omega' + i\omega''$ , где  $\omega''$  – постоянная сходимости. Имеем:

$$h_{\omega''}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty + i\omega''}^{\infty + i\omega''} h(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega, \quad (18)$$

$$h(t) = h_{\omega''}(t) e^{-i\omega'' t}. \quad (19)$$

Численное интегрирование (18) проводилось по квадратуре Файлона с автоматическим выбором шага интегрирования, что позволило создать эффективный алгоритм моделирования переходных процессов в трубах.

На рис. 1 приведены результаты математического моделирования кривых спада для трех-, четырех- и пятиколонной моделей. Трехколонная модель включает трубы: НКТ диаметром  $d = 73$  мм с толщиной стенки  $m = 6$  мм; эксплуатационную колонну (ЭК)  $d = 146$  мм; техническую колонну (ТК)  $d = 245$  мм. Для модели А расчеты проводились при условии, что толщина стенки ЭК меняется от 3 до 9 мм, при этом толщины НКТ и ТК остаются постоянными ( $m_{TK} = 8$  мм). На кривых спада изменение толщины ЭК регистрируется на временах переходного процесса больше 12 мс, в данном

случае до 98 мс. Чем больше время регистрации, тем больше разница между амплитудами сигнала в зависимости от толщины стенки трубы.

Для модели Б приведены результаты моделирования при условии, что толщина стенки НКТ и ЭК постоянная ( $m_{ЭК} = 8$  мм), изменяется толщина стенки ТК. На кривых спада изменение толщины ТК «видно» при  $t > 45$  мс. Очевидно, что для повышения чувствительности метода к третьей колонне необходимо увеличить время регистрации.

Временной диапазон для качественной оценки количества металла в трехколонной конструкции лежит в диапазоне 3–15 мс для НКТ, 15–45 мс для обсадной колонны и более 45 мс для ТК.

Кривые спада для четырех и пяти колонн приведены на рис. 1 (модели В и Г). Модели состоят из: НКТ  $d = 73$  мм,  $m = 5$  мм; ЭК  $d = 146$  мм,  $m = 7$  мм; ТК1  $d = 245$  мм,  $m = 7$  мм; ТК2  $d = 324$  мм; ТК3  $d = 450$  мм. ЭДС переходного процесса от четырех колонн приведенной модели регистрируется с 50 мс, а от пяти, при толщине ТК2 8 мм, – со 100 мс.

Алгоритм определения толщины стенки колонн, локальных дефектов, интервалов коррозии основан на компьютерном анализе измеренных кривых спада в скважине, полученных зависимостей на математических моделях [4] и из «базы знаний», созданной по результатам предыдущих измерений (за весь период существования метода).

При этом:

- на основе анализа кривых спада по данной скважине и кривых спада из «базы знаний» подтверждается конструкция;
- отмечаются интервалы с колоннами из одной марки стали;
- задаются номинальные значения толщины стенки и диаметр труб;
- сохраняются кривые спада в «базе знаний» для реперных интервалов;

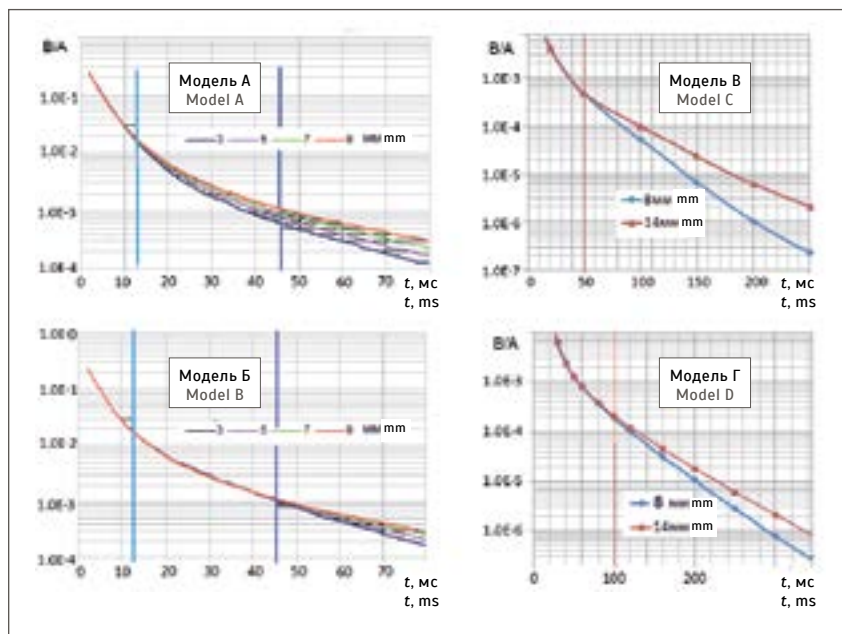


Рис. 1. Кривые спада: модель А – изменяется толщина стенки ЭК; модель Б – изменяется толщина стенки ТК; модель В – изменяется толщина стенки ТК2; модель Г – изменяется толщина стенки ТК3. Шифр кривых – толщина стенки трубы

Fig. 1. Drop-down curves: model A – the thickness of the production string wall is changing; model B – the thickness of the protective string wall is changing; model C – the thickness of the second protective string wall is changing; model D – the thickness of the third protective string wall is changing. Curves' code is the pipe wall thickness

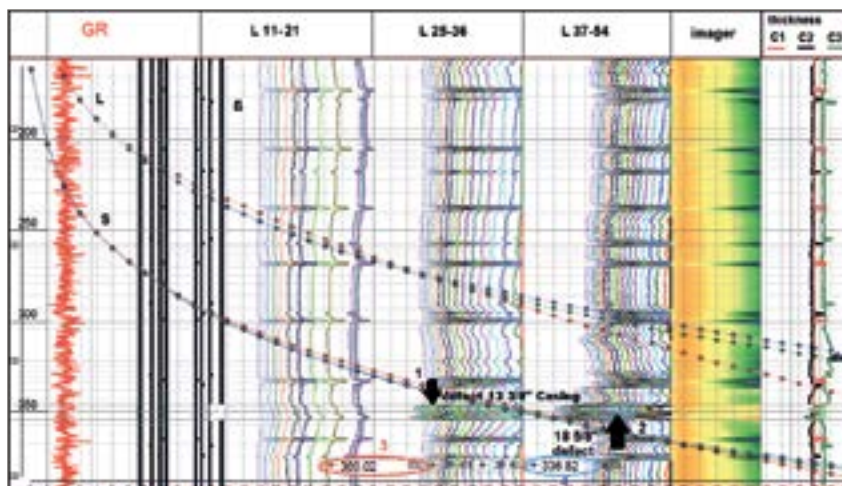


Рис. 2. Выявление участков коррозии в 3-й и 4-й колоннах: 1, 2 – аномалии в интервале коррозии; 3 – кривая спада на глубине 1097,6 м (360,02 фута) – коррозия; 4 – кривая спада на глубине 102,41 м (336,82 фута) – номинальная толщина

Fig. 2. Corrosion detection in the 3rd and 4th strings: 1, 2 – anomalies in the corrosion interval; 3 – drop-down curve at a depth of 1,097.6 m (360.02 feet) – corrosion; 4 – drop-down curve at a depth of 102.41 m (336.82 feet) – nominal thickness

- отмечаются муфты колонны (автоматически);
- вычисляется толщина стенки колонн на основе математического моделирования кривых спада для заданной модели и сопоставления с исходными данными;
- определяется принадлежность интервалов коррозии тре-



щин, локальных дефектов к определенной колонне.

Примеры определения толщины стенки колонн, интервалов коррозии в 3-й и 4-й колоннах ( $d_3 = 346$  мм и  $d_4 = 473$  мм) приведены на рис. 2, где стрелками 1 и 2 показаны аномалии на 25–54-м каналах длинного зонда, характерные для данного типа дефектов. Результаты подтверждаются сопоставлением кривых спада для интервала с номинальной толщиной (4) и коррозией (3). Отметим, что коррозия 3-й и 4-й колонн выявляется только на кривой спада длинного зонда  $L$ , кривые спада короткого зонда  $S$  в интервале коррозии и в целой трубе совпадают.

На рис. 3 представлены результаты расчета толщины для модели с двумя НКТ и после подъема НКТ. Результаты расчетов толщины стенки обсадных колонн хорошо согласуются при измерении через длинную колонну НКТ-1 (А), короткую колонну НКТ-2 (Б) и после подъема НКТ (В).

В последние годы для исследования обсадных колонн и НКТ используются микропрофилемеры, к примеру MIT. В зависимости от диаметра прибора он имеет 40–60 ножек, что позволяет достаточно детально исследовать внутреннюю поверхность стенки трубы. Зная диаметр внешней поверхности трубы и радиусы внутренней поверхности, можно определить толщину стенки колонны. По отношению максимального и минимального внутреннего радиуса оценивается степень износа колонны, при этом не учитывается износ внешней поверхности трубы.

Механические измерения не могут обеспечить определение нарушения на внешней поверхности трубы, нераскрывшейся трещины стенки и трещины шириной меньше 2 мм, тогда как МИД выявляет такие дефекты достаточно надежно.

Комплексирование измерения MIT с магнитоимпульсными дефектоскопами позволит исклю-

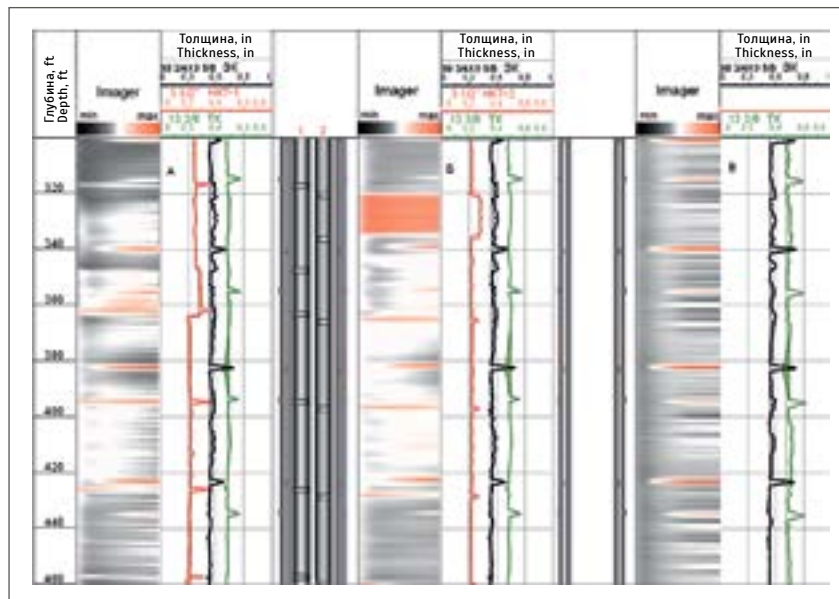


Рис. 3. Пример расчета толщины стенки труб в четырех- и двухколонной конструкции скважины:

А – каротаж через НКТ-1; Б – через НКТ-2; В – без НКТ

Fig. 3. Example of pipe wall thickness calculation in four- and two-string wells:

А – down-hole measurement via the first tubing pipe; В – down-hole measurement via the second tubing pipe; С – down-hole measurement with no tubing pipe

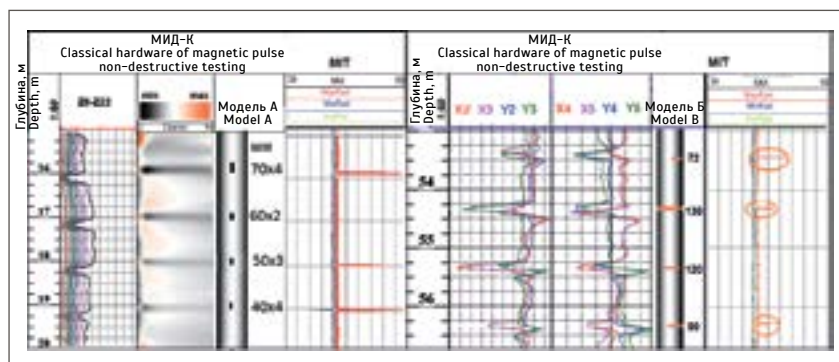


Рис. 4. Измерения в моделях, имитирующих продольные (модель А) и поперечные (модель Б) трещины

Fig. 4. Measurements in models that emulate longitudinal (model A) and cross (model B) cracks

чить пропуски внешних дефектов, трещин труб и более надежно определять параметры эксплуатационной колонны сквозь НКТ. Опыт работ по определению технического состояния методом МИД-К показал, что в интервалах со слабым сцеплением стенки колонны с цементным камнем или в случае его отсутствия возникает коррозия на внешней поверхности стенки, которую нужно контролировать.

Для оценки разрешающей способности зондов MIT и МИД-К

были проведены исследования на моделях, имитирующих трещины и локальные дефекты различных размеров.

Модель А (рис. 4) выполнена из трубы НКТ диаметром 73 мм с толщиной стенки 5,5 мм. Длина трещин меняется от 40 до 70 мм, а ширина – от 2 до 5 мм. Минимальная ширина (2 мм) – у трещин длиной 60 мм.

Для осевого зонда (z) МИД-К вертикальные трещины являются дефектом электрического типа (разрыв линий тока), что приводит

к падению ЭДС на приемной катушке, причем чем больше длина трещины, тем меньше амплитуда сигнала. Для поперечных зондов (x, y) продольные трещины – дефект магнитного типа (разрыв линий напряженности магнитного поля), что эквивалентно уменьшению магнитной проницаемости металла.

Все трещины по данным МИД-К надежно выявляются, на измерениях МИТ трещина шириной 2 мм на глубине 17 м пропущена.

Модель Б (рис. 4) представляет собой набор поперечных трещин различной длины. Поперечные трещины для осевого зонда МИД-К являются дефектом магнитного типа, а для зондов x, y – электрического типа и достаточно надежно определяются x-, y-зондами.

Микропрофилемером не зафиксирована трещина на глубине 55,3 м.

Результаты модельных исследований показали, что трещины шириной менее 2 мм не выделяются зондом МИТ, но он позволяет более надежно выявлять отверстия малых (8–10 мм) диаметров.

АО «НПФ «Гитас» имеет достаточно большой опыт комплексирования МИД-К и МИТ, выполнен значительный объем скважинных исследований, показавших преимущество совместной интерпретации материалов МИД-К и МИТ.

На рис. 5 приведены результаты исследования в скважине. По результатам измерений прибором МИД-К определены толщины

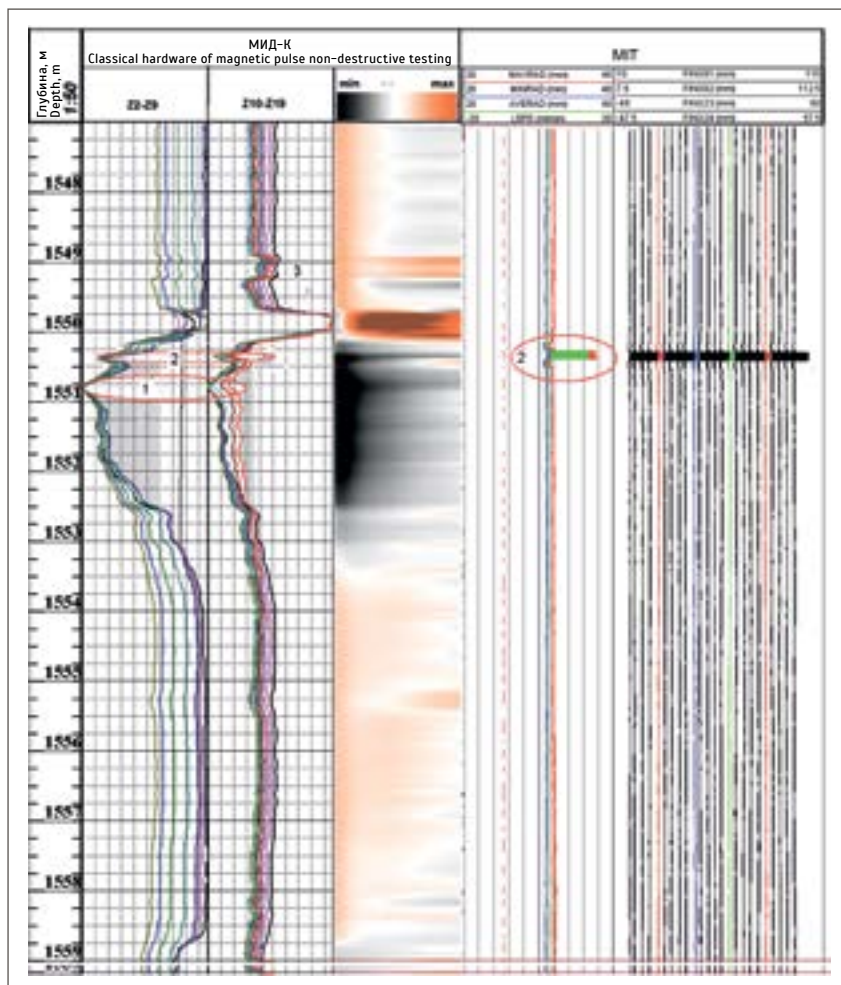


Рис. 5. Пример комплексирования МИД-К и МИТ.

1 – внешняя коррозия; 2 – сквозной дефект, 3 – центратор

Fig. 5. Example of the complexation of classical hardware of magnetic pulse non-destructive testing and MIT:

1 – external corrosion; 2 – through defect, 3 – centrator

стенки НКТ и эксплуатационной колонны, нарушение и коррозия в интервале 1550,0–1552,5 м в трубе НКТ. Коррозия однозначно развивается на внешней поверхности колонны, так как по данным

МИД-К падение сигнала связано с уменьшением толщины стенки, при этом по результатам МИТ коррозии на внутренней поверхности нет (радиусы постоянны и равны номинальной величине). ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев А.П., Шамшин В.И., Даниленко В.Н. Методическое руководство по проведению магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой МИД-Газпром и обработке результатов измерений. М.: Газпром, 2003. 79 с.
2. Даев Д.С. Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1974. 192 с.
3. Потопов А.П., Даниленко В.Н., Даниленко В.В., Головацкая Г.Ш. Технология оценки технического состояния обсадных колонн магнитоимпульсными дефектоскопами // Каротажник. 2016. № 6 (264). С. 112–134.
4. Потопов А.П., Даниленко В.Н., Даниленко В.В., Кнеллер Л.Е. Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия скважин многоколонной конструкции методом переходных процессов // Каротажник. 2016. № 6 (264). С. 134–152.

#### REFERENCES

1. Zubarev A.P., Shamshin V.I., Danilenko V.N. Methodical Guidance on Magnetic Pulse Non-Destructive Testing and Thickness Gauging in Oil and Gas Wells by the Magnetic Pulse Detector of Gazprom and Processing the Measurement Results. Moscow, Gazprom, 2003, 79 p. (In Russian)
2. Daev D.S. High-Frequency Electromagnetic Methods of Well Study. Moscow, Nedra, 1974, 192 p. (In Russian)
3. Potapov A.P., Danilenko V.N., Danilenko V.V., Golovatskaya G.Sh. Technology of the Assessment of the Technical State of Casing Strings by the Magnetic Pulse Detectors. Karotazhnik = Logger, 2016, No. 6 (264), P. 112–134. (In Russian)
4. Potapov A.P., Danilenko V.N., Danilenko V.V., Kneller L.E. Electromagnetic Non-Destructive Testing and Thickness Gauging of Multi-String Wells by the Transient Process Method. Karotazhnik = Logger, 2016, No. 6 (264), P. 134–152. (In Russian)