

УДК 550.832.75:622.245.1

Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия многоколонных скважин методом переходных процессов

Г.И. Головацкая^a, А.П. Потапов^a, В.А. Шумилов^b^a АО НПП «ВНИИГИС»

452614, Октябрьский, РФ, ул. Горького, 1. E-mail: gulgran@yandex.ru, potapov-57@bk.ru

^b Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Генкеля, д. 8, ауд. 620. E-mail: shum5011@gmail.com

(Статья поступила в редакцию 28 августа 2023 г.)

Метод переходных процессов является наиболее эффективным при исследовании многоколонных скважин. Во-первых, измерение нестационарного поля производится после выключения тока в отсутствие первичного поля, что позволяет сократить разнос катушек до нуля, т.е. совместить генераторную и приемные катушки. А это существенно улучшает вертикальную характеристику зонда, позволяет регистрировать малые дефекты. Во-вторых, при нестационарном режиме значительно проще разделить сигналы от первой, второй, третьей и т.д. колонн, чем при гармоническом режиме, что повышает точность вычисления толщины и определения дефектов. В работе предложен алгоритм интерпретации результатов измерений.

Ключевые слова: *многоколонная скважина, электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия, обсадные колонны, кривые спада, толщина колонн.*

DOI: 10.17072/psu.geol.22.3.238

Введение

В последние годы нефтяные и газовые компании проявляют большой интерес к технологиям, позволяющим оценить техническое состояние третьей, четвертой колонн, что потребовало развития теории, методики интерпретации для исследования многоколонных скважин.

Компанией ЗАО НПФ «ГИТАС» в 2007 г. была подана заявка на изобретение, а в 2009 г. получен патент на способ электромагнитной дефектоскопии многоколонных скважин (патент № 2364719 РФ). Авторы патента предложили использовать импульсы разной длительности при возбуждении электромагнитного поля в колоннах труб. Короткие импульсы создают электромагнитное поле в ближней зоне, с увеличением длительности импульса поле проходит в более дальние от оси скважины трубы. Такой принцип возбуждения электромагнитного поля позволил повысить качество интерпретации за счет более надежного разделения сигналов от разных колонн.

В 2014 г. предприятием TGT Oil & Gas services получен патент на способ электромагнитной дефектоскопии многоколонных скважин (патент № 2507393 РФ), в основу которого лег патент № 2364719 РФ. Отличие способа заключается в использовании нескольких зондов разной длины. Компания Halliburton получила патент на импульсный прибор для исследования многоколонных скважин (Khalaj, Donderici и др., 2018), идея которого также вытекает из патента № 2364719 РФ.

Физические основы электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии многоколонных скважин

Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия, основанная на методе переходных процессов (МПП), является наиболее эффективной при исследовании многоколонных скважин. Во-первых, измерение электродвижущей силы (ЭДС) затухающих во времени вихревых токов производится в отсутствие первичного поля, что позволяет сократить разнос между генераторной и измерительной

катушками до нуля (практически совместить их), что существенно улучшает вертикальную характеристику зонда, позволяет регистрировать малые дефекты. Во-вторых, при нестационарном режиме значительно проще разделить сигналы от первой, второй, третьей и последующих труб, чем при гармоническом режиме, повысив точность вычисления толщины стенок труб и определения принадлежности дефектов к конкретной колонне.

Для создания электромагнитного поля в многоколонной скважине, обсаженной трубами большого диаметра, нужны генераторные катушки достаточно большой длины, равной примерно диаметру последней колонны, что снижает вертикальное разрешение метода. Использование многозондовых систем позволяет повысить вертикальное разрешение для первой и второй колонн, поскольку для их исследования можно использовать более короткие катушки, чем для третьей и четвертой.

Принцип измерений основан на регистрации кривых спада (КС) переходных процессов вихревых токов J_v , наведенных в четырех колоннах после прохождения импульса тока через генераторные катушки, создающие первичное электромагнитное поле H_0 (рис. 1), где S – короткий, M – средний, L – длинный зонды.

Короткий зонд возбуждает вихревые токи J_v в ближней от оси прибора зоне, средний зонд – в первой, второй и третьей колоннах, длинный зонд – в трех и более колоннах.

Наиболее эффективный способ реализации измерений в многоколонных скважинах большого диаметра предложен в патенте № 2636064 РФ. Импульс тока питания длительностью τ пропускается через все три генераторные катушки зондов S, M и L. Генераторная катушка зонда S в момент времени $t_1 < \tau/4$ отключается от питания и проводится регистрация КС_S измерительной катушкой S зонда, в момент времени $t_2 > 3t_1$ отключается генераторная катушка зонда M и проводится регистрация КС_M. После прохождения импульса тока τ через генераторную катушку зонда L измеряются КС_L приемной катушкой длинного зонда.

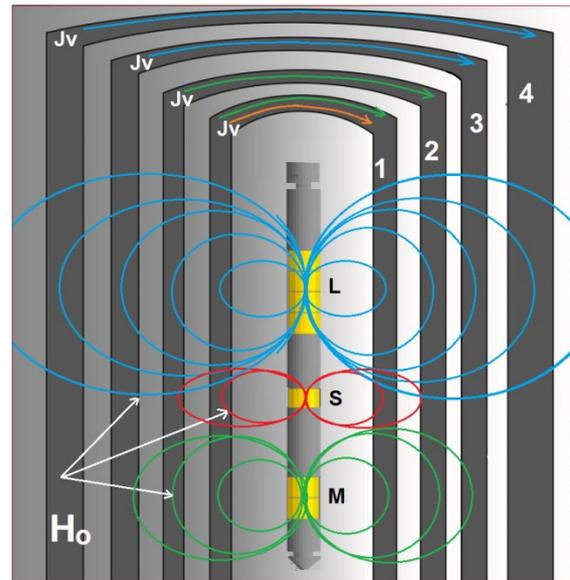


Рис. 1. Зондовая установка: H_0 – первичное магнитное поле; 1,2,3,4 – колонны

На рис. 2 приведены результаты измерений кривых спада для двух, трех и четырехколонных физических моделей, составленных из труб диаметрами $D_1=73$ мм, $D_2=146$ мм, $D_3=245$ мм и $D_4=324$ мм. На ранних временах переходного процесса $t < 50$ мс КС для 1,2,3-й моделей совпадают для зондов S, M, L. На средних временах $50 < t < 250$ мс КС среднего и длинного зондов расходятся для двух- и трехколонных моделей. На поздних стадиях переходного процесса $t > 250$ мс КС только длинного зонда для трех- и четырехколонных моделей расходятся.

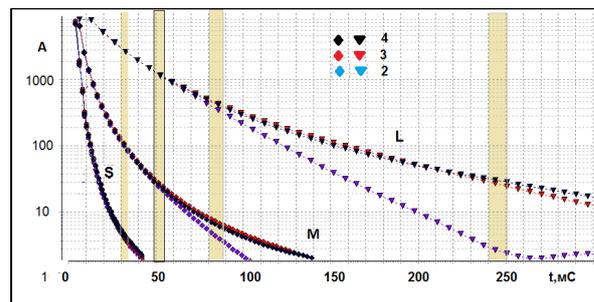


Рис. 2. Кривые спада короткого, среднего и длинного зондов (S, M, L); 2, 3, 4 – число колонн

Алгоритм определения толщины стенок колонн

Наряду с толщиной стенки трубы на измеряемый сигнал влияют магнитная проницаемость и электропроводность металла.

Магнитная проницаемость (μ) используемых труб в основном изменяется в диапазоне 10–60 отн. ед., а удельная электропроводность в диапазоне от 5 до 8 МСм/м. Для слабомагнитных труб μ варьирует в диапазоне 10–20, среднемагнитных – 20–40 и сильномагнитных – более 50. Диаметр труб изменяется от 73 до 510 мм. Толщина стенок труб может меняться от 5 до 9 мм для насосно-компрессорных труб (НКТ), от 7 до 12 мм для эксплуатационных колонн, от 9 до 18 мм для обсадных колонн.

Электромагнитные свойства металла могут изменяться в процессе эксплуатации колонн. Возникают участки повышенной намагниченности, изменяется электропроводность колонны, по сравнению с паспортными данными, под действием температуры, коррозии. В ряде случаев в состав колонны попадают единичные трубы либо небольшие интервалы труб из другой марки стали, в отличие от основной колонны.

Задача формулируется следующим образом. Имеются вектор измерений $\vec{Y} = E(t_i)$ и вектор искомых параметров $\vec{X} = \{\mu_j, \sigma_j, T_j\}$, где $i=1, M; j=1, N$; M – число измерений, N – число колонн. Под измерением понимают значения амплитуды КС, зарегистрированные с шагом квантования по времени Δt . Искомые параметры: μ_j, σ_j, T_j – соответственно магнитная проницаемость, электропроводность и толщина j -той колонны. Известна связь между векторами \vec{Y} и \vec{X} – $\vec{Y} = F(\vec{X})$. Оператор F нелинейный и определяется решением прямой задачи для заданной модели скважины.

Необходимо определить \vec{X} таким образом, чтобы рассчитанные на основе прямых задач измерения и показания прибора минимально отклонялись в заданной метрике.

При этом \vec{X} определяется из условия

$$W = \sum_{j=1}^M \left(\frac{Y_j - F(\vec{X})}{\delta Y_j + \varepsilon} \right)^2, \quad (1)$$

где ε, δ – абсолютная и относительная погрешности измерений; F – оператор решения прямой задачи.

Поскольку имеются измерения разноглубинными зондами, целесообразно искать решение последовательным усложнением

модели. Это уменьшает размерность обратной задачи на каждом этапе поиска решения и повышает достоверность полученных результатов.

На первом этапе определяются параметры двухколонной модели. Исходные данные – кривые спада короткого и среднего зондов на временном интервале, наиболее информативном для данной модели скважины (число колонн, диаметры колонн, номинальные толщины).

На втором этапе определяются параметры третьей и четвертой колонн на основе решения обратной задачи для четырехколонной модели при условии, что параметры первой и второй известны. Исходными данными являются КС длинного зонда на заданном временном интервале.

Метод вычисления толщины стенки колонн основан на решении обратной задачи путем последовательного усложнения интерпретационной модели, начиная с одноколонной модели и заканчивая четырехколонной. Это позволяет резко сократить размерность задачи на каждом этапе поиска решения и повысить достоверность полученных результатов. Для минимизации функционала (1) использовался метод подбора, приведенный в работе (Потапов, Даниленко и др., 2016).

Для оценки возможности алгоритма определения толщины стенок по прямой задаче были смоделированы измерения для различных моделей четырехколонных конструкций с различными параметрами μ, σ, T . Затем проводилась инверсия этих кривых с учетом погрешностей в измерениях (2%). В таблице приведены результаты решения обратной задачи ($T_{\text{НКТ}}, T_{\text{ЭК1}}, T_{\text{ЭК2}}, T_{\text{ТК}}$) для четырехколонной модели, $\mu_{\text{НКТ}}=20, \mu_{\text{ЭК1}}=40, \mu_{\text{ЭК2}}=40, \mu_{\text{ТК}}=50, \sigma_{\text{НКТ}}=\sigma_{\text{ЭК1}}=\sigma_{\text{ЭК2}}=\sigma_{\text{ТК}}=8 \cdot 10^6$ См/м, $T_{\text{НКТ}} - 6$ мм, $T_{\text{ЭК1}} - 8$ мм, $T_{\text{ЭК2}} - 8$ мм, $T_{\text{ТК}} -$ заданы в таблице.

Погрешность определения толщины стенки НКТ не превышает 0,08 мм, ЭК1 – 0,32 мм, ЭК2 – 0,35 мм, ТК – 0,52 мм. Относительная средняя погрешность определения $\mu_{\text{ТК}} - \delta\mu_{\text{ТК}}=10\%$, погрешность определения $\sigma_{\text{ТК}} - \delta\sigma_{\text{ТК}}=8\%$.

Для всех моделей достигнуто минимальное значение $W < 1$ для смоделированных ошибок в измерениях, что свидетельствует о хорошей сходимости итерационного процесса.

Таблица. Результаты определения толщины четырех колонн

Т _{ТК} , мм	Т _{НКТи} , мм	Т _{ЭК1и} , мм	Т _{ЭК2и} , мм	Т _{ТКи} , мм
6	6,07	7,85	7,46	6,52
8	6,08	8,04	7,51	8,37
10	6,05	7,68	7,65	10,04
12	6,03	8,10	7,71	12,5

Предложенный метод решения обратной задачи для всей кривой позволяет с достаточной точностью определять толщину труб в многоколонных скважинах с учетом их электромагнитных характеристик μ и σ .

На рис. 3 приведены результаты измерений на физической модели и вычисление толщины стенки для четырехколонной модели, где № 1 – труба диаметром $D=180$ мм, № 2 – $D=246$ мм, № 3 – $D=342$ мм, № 4 – $D=426$ мм. Максимальное отклонение результатов расчета толщины ΔT в первой гладкой трубе № 1 не превышает 0,1 мм. Отклонение результатов расчета толщины трубы № 2 при номинальном её значении ΔT_n не превышает 0,23 мм в интервале длиной 600 мм с уменьшения толщины от номинального значения до 2 мм, максимальная абсолютная погрешность ΔT_n не более 0,49 мм, для трубы № 3 – $\Delta T_n=0,15$ мм, с интервалом уменьшения толщины до 7 мм длиной 800 мм – $\Delta T_n=0,45$ мм. Для трубы № 4 с интервалом уменьшения толщины длиной 1000 мм до 5 мм – $\Delta T_n=0,49$ мм; (пропущен размер?) – $\Delta T_n=0,58$ мм.

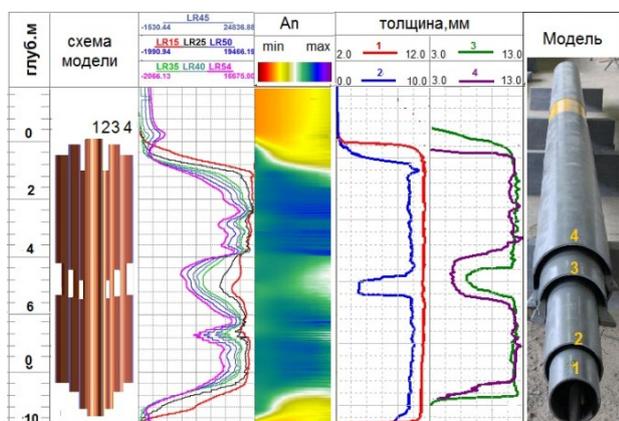


Рис. 3. Результаты измерений и вычисление толщины стенки для 4-х колонных моделей

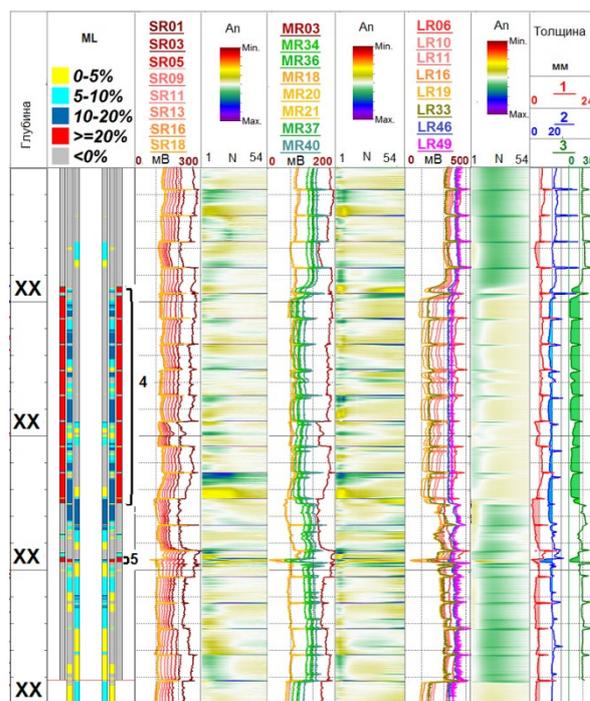


Рис. 4. Пример интерпретации в 3-х колонной скважине 1,2,3-толщина соответствующих колонн

На рис. 4 приведен пример оценки толщины стенок многоколонной скважины, которая включает: НКТ диаметром $D=89$ мм (1), обсадная первая колонна – $D=178$ мм (2), обсадная вторая – $D=245$ мм (3), обсадная третья – $D=324$ мм (4), где SR, MR, LR – кривые спада короткого, среднего и длинного зондов, числовые индексы – временные каналы, ML – отклонение толщины от номинального значения. В интервале 4 разрушение третьей колонны, что подтверждается расчетом толщины $T_3=0.мм\pm\Delta T_3$ и резким падением амплитуды КС длинного зонда, в интервале 5 нарушение во второй и третьей колоннах $T_2=0мм\pm\Delta T_2$ $T_3=0мм\pm\Delta T_3$, резкое падение амплитуды КС среднего и длинного зондов, где ΔT_3 , ΔT_2 – абсолютные погрешности определения толщины соответствующих колонн.

Выводы

На основе физического моделирования КС определены информативные временные интервалы при определении нарушений и толщины колонн.

Использование зондов разной длины позволяет построить методику определения

нарушений в многоколонных скважинах и алгоритм вычисления толщины колон путем последовательного усложнения интерпретационных моделей.

Результаты подтверждены на математических и физических моделях, а также в действующих скважинах.

Библиографический список

Патент № 2636064 РФ. Способ электромагнитной дефектоскопии в многоколонных скважинах. / А.П. Потапов № 2016128899, заявл. 14.07.2016; опубл. 20.11.2017.

Патент № 2364719 РФ. Способ электромагнитной дефектоскопии в многоколонных скважинах. / А.Н. Наянзин, А.П. Потапов, заявитель

и патентообладатель ЗАО НПФ «ГИТАС». № 2007142168.03, заявл. 14.11.2007; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23.

Патент № 2507393 РФ. Способ электромагнитной дефектоскопии / А.М. Асланян, Д.А. Давыдов, А.Д. Арбузов, Д.Ю. Пятницкий. / TGT Oil and Gas services, (AE) №2012137077/03, заявл. 31.08.2012; опубл. 20.02.2014. Бюл. № 5.

Потапов А.П., Даниленко В.Н., Даниленко В.В. и др. Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия скважин многоколонных конструкций методом переходных процессов // Каротажник. Тверь: АИС. 2016. № 6 (264). С. 134–162.

Khalaj A.R., Donderici B., San M.L. Eddy-current responses in nested pipes. US 2018/0313 A1 (Patent), 2018.

Transient Electromagnetic Flaw Detection and Casing Wall Thickness Measurements in Multi-String Wells

G.I. Golovatskaya^a, A.P. Potapov^a, V.I. Shumilov^b

^a NPP VNIIGIS PJSC, 1 Gorkiy Str., Oktyabrskiy 452614, Russia

E-mail: gulgran@yandex.ru, potapov-57@bk.ru

^b Perm State University, 8 Genkelya Str., Perm 614990, Russia

E-mail: shum5011@gmail.com

The transient electromagnetic method is the most effective in the studying of multi-string wells. First, the non-stationary field is measured after the current is turned off (without the primary field) that reduces the coil spacing to zero, i.e. combine the generator and receiver coils. This significantly improves the vertical characteristic of the probe, allows the probe to register small defects. Second, the non-stationary mode allows separating signals from the first, second, third, etc. strings much easier than the harmonic mode. It improves the accuracy of thickness estimation and defect detection. The paper proposes an algorithm for interpreting the measurement results.

Key words: *multi-string well; electromagnetic flaw detection and thickness measurement; casing; decline curves; pipe wall thickness.*

References

Patent 2636064 RF. Metod elektromagnitnoy defectoskopii mnogokollyh skvazhyn [Method of electromagnetic defectoscopy in multi-column wells]. Potapov A.P. No. 2016128899, declared 14.07.2016; publ. 20.11.2017.(in Russian).

Patent 2364719 RF. Metod elektromagnitnoy defectoskopii mnogokolonnykh skvazhyn [Method of electromagnetic defectoscopy in multi-column wells]. Nayanzin A.N., Potapov A.P., applicant and patent holder is ZAO NPF GITAS. - No. 2007142168.03, declared 14.11.2007; publ. 20.08.2009. Bull. No. 23. (in Russian).

Patent 2507393 RF. Metod elektromagnitnoy defectoskopii [Method of electromagnetic defectos-

copy]. A.M. Aslanyan, D.A. Davydov, A.D. Arbuзов, D.Yu. Pyatnitsky. TGT Oil and Gas services, (AE) No. 2012137077/03, declared 31.08.2012; publ. 20.02.2014. Bull. No. 5. (in Russian).

Potapov A.P., Danilenko V.N., Danilenko V.V. 2016. Elektromagnitnaya defectoskopiya - tolshchinometriya skvazhyn mnogokolonnykh konstruktсий metodom perehodnykh prostessov [Technology for assessing the technical condition of casing strings with magnetic pulse flaw detectors] .Karotazhnik. AIS. 6(264):134-162. (in Russian)

Khalaj A.R., Donderici B., San M.L. Eddy-current responses in nested pipes. US 2018/0313 A1 (Patent) 2018.