

На правах рукописи



Головацкая Гульнара Ишмухаметовна

**МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ДЕФЕКТОСКОПИИ-ТОЛЩИНОМЕТРИИ МНОГОКОЛОННЫХ
СКВАЖИН МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 1.6.9 – «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2024

Работа выполнена на кафедре геофизики геологического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «**Пермский государственный национальный исследовательский университет**» (ФГАОУ ВО ПГНИУ) и в АО НПП «**ВНИИГИС**» (Акционерное общество Научно производственное предприятие Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт геофизических исследований геологоразведочных скважин).

Научный руководитель: **Шумилов Александр Владимирович,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Эпов Михаил Иванович,** доктор технических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»

Кузьмичев Олег Борисович, кандидат физико-математических наук, старший эксперт ООО «РН-БашНИПИнефть»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Университет «Дубна»**»

Защита диссертации состоится «30» мая 2024 г. в 15.15 на заседании диссертационного совета 24.2.358.01 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета www.psu.ru.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, в двух экземплярах направлять по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15, ПГНИУ, ученому секретарю диссертационного совета Красильникову Павлу Анатольевичу. Тел: +79026460659, e-mail:dissovet.geol@mail.com.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2024г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.358.01,
доктор геолого-минералогических наук, доцент

Красильников Павел Анатольевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В течение последних 25 лет основное усилие по техническому состоянию нефтегазовых скважин было направлено на исследование и расчет толщин первых двух колонн труб, оставляя без внимания остальную часть конструкции скважины, состоящую из 3, 4 и 5 колонн. Для контроля межколонных перетоков в 3, 4 и 5-й колоннах нефтегазовые компании проявляют интерес к технологиям, позволяющим осуществлять этот контроль.

Многие месторождения нефти и газа разрабатываются на поздней стадии разработки, а большое количество подземных хранилищ газа находится в эксплуатации 50 лет и более. С точки зрения надежности и экологической безопасности все большее значение приобретают работы в области разработки методов интерпретации результатов измерений, технических средств и диагностики не только эксплуатационных (ЭК) и насосно-компрессорных (НКТ) колонн, но и других элементов конструкции скважин. Особое значение приобретают разработки теоретических основ метода электромагнитной дефектоскопии, методики интерпретации и технологии её применения в многоколонных скважинах.

Степень разработанности темы исследования

Электромагнитная дефектоскопия применяется для предотвращения возможных аварийных ситуаций в процессе бурения и капитального ремонта скважин; используется для решения задач ГИС-контроля (выделение интервалов перфорации, границ врезов и элементов конструкции, дефектов колонны); позволяет осуществлять контроль щелевой гидropескоструйной перфорации (А.Е. Арутюнов, В.Н. Даниленко, А.П. Зубарев, В.И. Шамшин, С.А. Венско, С.М. Дудаев, В.А. Марков, М.И. Новохатский, А.В. Шумилов, Xit Ranghua, Kiu Jisheng, Thang Yaeqie, Yancai Sun). Данные расчётов толщины используются для оценки остаточной прочности обсадных колонн (В.Е. Дубенко, О.Л. Кузнецов, Н.Г. Федорова, А.А. Даутов, С.Б. Свиницкий).

В НТУ «Татнефтегеофизика» выпускается аппаратура АМИД-42, основой которой является комплекс ЭМДС-42 (Р.И. Юсупов, В.В. Баженов, В.А. Лифантьев).

В ООО «Оренбурггеофизика» был разработан комплекс ЭМДС-И. Этот комплекс отличается от ЭМДС-ТМ-42 (АО НПП «ВНИИГИС») тем, что обеспечивается более детальная передача спада ЭДС осевого зонда, время измерения увеличено до 300 мс (В.А. Марков, О.В. Иванов, В.Ф. Шулаев).

Электромагнитный дефектоскоп ЗАО НПП ГА «Луч» позволяет определять толщину и дефекты обсадных колонн. Для исследования используется дифференциальное, полное слабое, полное сильное магнитное поле (М.И. Эпов, К.Н. Каюров, А.С. Мартынов, Г.М. Морозова).

В АО НПФ «ГИТАС» созданы аппаратные комплексы МИД-К, МИД-Газпром, МИДС-К. В результате исследований определяется толщина первой и второй колонн, интервалы коррозии и перфорации в двухколонных

конструкциях, в том числе дефекты обсадных колонн (В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, А.П. Потапов).

Созданием теории и аппаратуры для электромагнитных исследований скважин в различные годы занимались: Е.Ю. Антонова, Ю.Н. Антонов, В.И. Дворкин, Л.Е. Кнеллер, И.Г. Кузин, О.Б. Кузьмичев, А.А. Миллер, А.В. Миллер, А.С. Могилатов, Г.М. Морозова, В.А. Пантюхин, А.П. Потапов, В.А. Сидоров, В.К. Теплухин, Р.Т. Хаматдинов, Е.В. Чаадаев, М.И. Эпов, Yanxiang Yu, N. Boggs, Kuang Qin, M. Rourke, K. Amind, R.K. Amind, S. Dutta, J. Olaiy и др.

Вопросами интерпретации электромагнитной дефектоскопии занимались А.В. Миллер, А.А. Миллер, А.П. Потапов, М.И. Эпов, Г.М. Морозова, В.С. Могилатов, И.Г. Кузин, M.L. Zeghbache, R. Rourke, X. Liu, M. Saada, M. Ismail.

Основные результаты исследований названных учёных были учтены при работе над диссертацией.

Цель и задачи исследования

Повышение точности результатов, разрешающей способности и эффективности применения электромагнитной дефектоскопии путём разработки методического обеспечения для оценки технического состояния обсадных труб в многоколонных скважинах.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Решить численную задачу о распространении поля соленоида в условиях многоколонных конструкций. Разработать соответствующее математическое, программное обеспечение.
2. Провести моделирование кривых спада (КС) для различных типовых моделей многоколонных скважин и оценить возможность и достоверность определения толщины 3-й, 4-й и 5-й колонн.
3. Оценить степень влияния количества колонн, магнитной проницаемости и удельной электропроводности на результаты измерений.
4. Обосновать наиболее информативные временные интервалы переходного процесса в зависимости от геометрии и электромагнитных свойств модели.
5. Разработать математическое, программное методическое обеспечение для определения толщины.
6. Разработать теоретические, методические основы обработки и интерпретации материалов магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии.
7. Опробовать методику на физических моделях.
8. Провести исследования на скважинах с использованием разработанной методики интерпретации.

Научная новизна

1. Теоретически обоснованы наиболее информативные временные интервалы на кривых спада переходного процесса при интерпретации

измерений и установлено, что изменение магнитной проницаемости второй, третьей, четвертой и пятой колонн регистрируется на более поздних временах.

2. Для пятиколонных скважин разработан алгоритм определения толщины стенок колонн на основе математического моделирования кривых спада для разноглубинных зондов и итерационного поиска неизвестных параметров с поэтапным усложнением интерпретационной модели.

3. Разработана методика интерпретации материалов электромагнитной дефектоскопии, включающая алгоритм вычисления толщины на основе математического моделирования и базу знаний (БЗ), сформированную по результатам скважинных исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическое значение работы состоит в изучении влияния электромагнитных свойств металла, геометрии и количества колонн на результаты измерений и разработки методики интерпретации электромагнитной дефектоскопии методом переходных процессов (МПП), оценки толщины, наличия дефектов обсадных труб многоколонных скважин.

Полученные в работе результаты позволяют повышать надёжность и информативность электромагнитных исследований в скважинах.

Проведенные исследования позволили научно обосновать и практически разработать методику интерпретации электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии многоколонных нефтяных и газовых скважин.

В настоящее время выпущено более 40 аппаратно-методических комплексов МИД-4. С использованием аппаратуры проведено исследование более чем в 200 скважинах: нефтедобывающих, разведочных, газовых, подземных хранилищ газа (ПХГ), специального назначения, пробуренных на воду и другие полезные ископаемые.

Результаты работы используются в ПАО «Газпром».

Методология и методы исследований

В состав исследований входило: изучение теоретических основ электромагнитных методов исследования скважин, моделирование кривых спада переходного процесса вихревых токов в металлических трубах, анализ результатов физического моделирования, интерпретация скважинных исследований на ПХГ Газпром, участие в написании отчёта по результатам научных работ с использованием созданной методики интерпретации.

В процессе проведения исследований автор использовал известные решения теории электромагнитных полей, преобразования Фурье, полином Чебышева для расчёта функции Бесселя.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика классификации дефектов от первой до пятой обсадных колонн и аномалий на каротажных кривых, вызванных коррозией и изменением магнитных свойств металла колонн, основанная на численном моделировании сигналов электромагнитной дефектоскопии.

2. Программно-методическое обеспечение определения толщины колонн с учетом изменения электромагнитных свойств металла на основе

математического моделирования и итерационного поиска решений с поэтапным усложнением интерпретационной модели скважины от двух до пяти колонн, с использованием геофизических исследований в скважинах коротким, средним и длинным зондами.

3. Методика интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии скважин, включающая алгоритм вычисления толщины, базу знаний, сформированную по результатам физического моделирования и оценки технического состояния колонн предыдущих скважинных исследований, позволяет оценивать техническое состояние скважин с пятиколонной конструкцией.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов была подтверждена научным сообществом в ходе обсуждения публикаций в научных журналах, в докладах на научно-практических конференциях, опытно-промышленными работами по оценке технического состояния обсадных колонн нефтяных и газовых скважин, подземных хранилищ газа в Оренбургской, Астраханской, Саратовской, Московской областях, Беларуси, Казахстане.

По теме диссертационной работы опубликовано лично и в соавторстве 11 статей, из них 6 статей в журналах перечня ВАК, 5 публикаций – в изданиях РИНЦ, а также 1 монография (в соавторстве). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (в соавторстве). Основные положения и результаты работы изложены в статьях научных журналов и докладывались на международных, российских, республиканских и региональных конференциях, семинарах:

– 6th Saint Petersburg International Conference Exhibition, г. Санкт-Петербург, 7–10 апреля 2014 г.;

– XXV научно-практической конференции «Модернизация российского геофизического комплекса», ГК «Кандрыкуль», 16 февраля 2021 г.;

– IV Международной научно-практической конференции «Технологии и аппаратура для геофизических исследований в скважинах при решении актуальных задач разведки и разработки нефти, газа, твердых полезных ископаемых», г. Октябрьский, 13–16 октября 2021 г.;

– XXIX научно-практической конференции им. Лаптева В.В. «Новая техника и технологии для трудноизвлекаемых запасов углеводородов», г. Уфа, 24 мая 2023 г.;

– The 14th International Symposium on New Well Logging Techniques, Qingdao China, aprile 11–23 2023.

Личный вклад автора

Автором были проведены численные расчёты по учёту и оценке влияния геометрических и электромагнитных параметров колонн на кривые спада переходного процесса. Были выбраны и определены базовые наборы труб с различными характеристиками для проведения модельных исследований и создания базы данных (БД), используемой для определения толщины труб многоколонных конструкций.

При проведении модельных работ осуществлён анализ численных расчётов и реальных измерений кривых спада переходного процесса для определения соответствия теоретических моделей полученным опытным путём.

При создании программного обеспечения UniMID, DeVizSM5 (совместно с А.П. Потаповым и А.Л. Шаровым) были предложены и реализованы алгоритмы по привязке данных МИД по глубине и созданию удобного интерфейса для обработки и интерпретации зарегистрированных материалов. В процессе опробования проведена оптимизация интерфейса и алгоритма интерпретации путем обработки данных на опытных моделях и реальных скважинах.

В процессе тестирования ПО UniMID, DeVizSM5 автором проведено исследование более 100 скважин с многоколонными конструкциями.

В статьях по развитию технологии интерпретации магнитоимпульсной дефектоскопии автору принадлежит методика интерпретации, позволившая оценить влияние физических и геометрических параметров колонн на уровень сигнала переходного процесса.

Благодарности от автора

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, доктору технических наук А.В. Шумилу, который на всех этапах исследования способствовал написанию этой работы и детально ознакомился с рукописью диссертации, сделав ряд ценных замечаний.

Успешному проведению работы способствовали директор АО НПФ «ГИТАС», к.т.н. В.Н. Даниленко, под руководством которого выполнены исследования по магнитоимпульсной дефектоскопии многоколонных скважин, к.т.н. А.П. Потапов, под руководством и при участии которого получены основные результаты, изложенные в работе.

Автор выражает признательность заведующему кафедрой БашГУ профессору, доктору технических наук Р.А. Валиуллину за поддержку диссертационной работы и ряд ценных замечаний, к.т.н. Л.Г. Леготину за предоставление фактических материалов. Неоценимую помощь во внедрении программных и методических разработок в производство оказал к.т.н. В.И. Шамшин.

Автор считает своей приятной обязанностью поблагодарить зав. отделом АО НПП «ВНИИГИС», к.т.н. В.В. Даниленко за организацию работ по проведению исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы 133 страницы текста, включая 83 рисунка, 30 таблиц и список литературы из 82 наименований.

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных лично автором, при его непосредственном участии в отделе программно-управляемой геофизической аппаратуры с 2005 года.

Алгоритмы определения толщины стенки колонн

Известны различные подходы к определению толщины стенки колонн. В работе А.А. Миллера толщина вычисляется на основе приближенных аналитических зависимостей между значением электродвижущей силы (ЭДС) и толщиной стенки для различных электромагнитных параметров колонны.

В работе М.И. Эпова, Г.М. Морозовой, Е.Ю. Антонова приведен алгоритм решения обратной задачи электромагнитной дефектоскопии колонн, основанный на разложении экспериментальной ЭДС в ряд Тейлора в окрестности теоретической ЭДС, соответствующей базовой модели.

Для инверсии электромагнитных данных используется линеаризованная постановка прямой и обратной задач в окрестности некоторой базовой модели.

В работах А.П. Потапова, Л.Е. Кнеллера предложен подход на основе решения прямой и обратной задач становления поля в коаксиально-цилиндрических средах.

Краткое описание принципа измерения переходных процессов вихревых токов в многоколонных скважинах

Метод переходных процессов (МПП) 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 (внутренней), второй, третьей и т.д. труб, чем при гармоническом режиме, а следовательно, можно более точно вычислить толщину стенок труб, правильно привязать локальные дефекты к определенной колонне.

Принцип измерений основан на регистрации ЭДС вихревых токов J_v , которые наводятся в колоннах после прохождения импульса тока через генераторные катушки, создающие первичное электромагнитное поле H_0 . Вихревые токи J_v создают вторичное электромагнитное поле H_v , которое наводит ЭДС в приемных катушках.

Первое защищаемое положение. *Методика классификации дефектов от первой до пятой обсадных колонн и аномалий на каротажных кривых, вызванных коррозией и изменением магнитных свойств металла колонн, основанная на численном моделировании сигналов электромагнитной дефектоскопии [3,5,7–9,12].*

В последние годы нефтегазовые компании проявляют большой интерес к технологиям, позволяющим определять потерю металла в третьей, четвертой и пятой обсадных колоннах в газовых и нефтяных скважинах.

Первые результаты, позволяющие оценить техническое состояние третьей колонны, были получены в 2014 г. (А.В. Миллер, В.К. Теплухин). Была разработана комплексная аппаратура ЭМДС-3, позволяющая определять толщину стенок первой, второй и третьей колонн диаметром до 340 мм. В 2016 г. была разработана аппаратура МИД-4 (В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко),

позволяющая проводить исследования пятиколонных скважин. Развитие технологии оценки технического состояния четвертой и пятой колонн потребовало обоснования длительности импульсов тока возбуждения и времени регистрации кривых спада.

Для создания электромагнитного поля в пятиколонной скважине, обсаженной трубами большого диаметра, нужны зонды 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, так как для их исследования можно использовать более короткие зонды, чем для четырех и пяти колонн.

На Рисунке 1 приведен принцип регистрации переходных процессов в многоколонных скважинах.

Ближний зонд возбуждает вихревые токи (J_v) в первой колонне, короткий зонд – в первой и второй колоннах, длинный зонд – в трех и более колоннах.

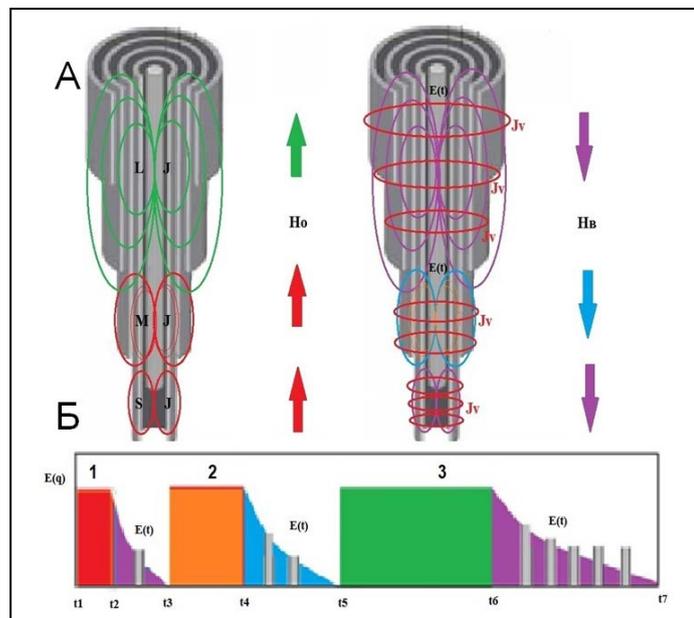


Рисунок 1 – Модель измерений переходных процессов в колонне для zz -компоненты поля:

А: L, M, S – совмещенные генераторные и измерительные катушки,

H_0 , H_b – первичное и вторичное магнитные поля, J_v – вихревые токи

Б: 1,2,3 – импульсы тока в соответствующих катушках, $E(t)$ – ЭДС вихревых токов, наведенных в колоннах

Для разработки методики классификации дефектов от первой по пятую колонну и разделения аномалий от изменения электромагнитных свойств стали и локальной коррозии необходимо определить наиболее информативные временные интервалы на кривых спада (КС) переходного процесса, характеризующих изменения свойств в заданных колоннах.

Для расчета КС для многоколонных моделей разработано программное обеспечение (ПО) на основе интеграла Фурье. Чтобы избежать искажения сигнала на больших временных интервалах используется оконная функция $w(\omega)$:

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

В качестве оконной функции выбрана функция Кайзера (А.М. Асланян, А.А. Арбузов, М.В. Волков и др., TGT Oil and Gas Services), где $h(\omega)$ – гармоническое электромагнитное поле на оси скважины в коаксиально-цилиндрической среде, выраженное в единицах поля магнитного диполя в воздухе.

Кривые спада в колоннах характеризуются амплитудой ЭДС – $E(t)$ как функцией времени и постоянной спада (затухания) $\lambda = d \ln(E(t)/dt)$.

Чувствительность метода как толщиномера определяется по формуле

$$\eta(t) = \frac{d \ln E(t)}{d \ln T_i},$$

где T_i – толщина стенки определяемой колонны, $i=1, N$, а N – число колонн.

Расчет кривых спада переходных процессов вихревых токов (КС) проведен для 1–5-колонных моделей скважин. Диаметры колонн (D) изменялись от 73 до 600 мм, магнитная проницаемость металла (μ) изменялась в диапазоне 10–120 отн. ед., электропроводность металла (σ) – $3 \cdot 10^7$ мСм/м, толщина стенки колонн (T) изменялась от 7 до 18 мм.

Время затухания переходных процессов в колоннах зависит от общей толщины обсадных труб и НКТ, их диаметров (d), удельной электропроводности (σ) и магнитной проницаемости (μ), диаметра внешней колонны. Начальная амплитуда КС обратно пропорциональна магнитной проницаемости, диаметру внутренней колонны.

По результатам моделирования показано, что начало времени регистрации КС во внешней колонне зависит от диаметра этой колонны, толщины стенки, диаметров внутренних колонн, их электропроводности и магнитной проницаемости. На Рисунке 2 приведены кривые спада для моделей 3, 4 (Таблица 1). КС для слабомагнитных первых трех колонн расходятся при $t > 150$ мс, а для магнитных – при $t > 400$ мс.

Таблица 1 – Четырехколонные модели

№ трубы	D, мм	T, мм	μ	
			Модель 3	Модель 4
1	114	9	10	60
2	178	14	10	60
3	305	16	10	60
4	508	8-18	30	60

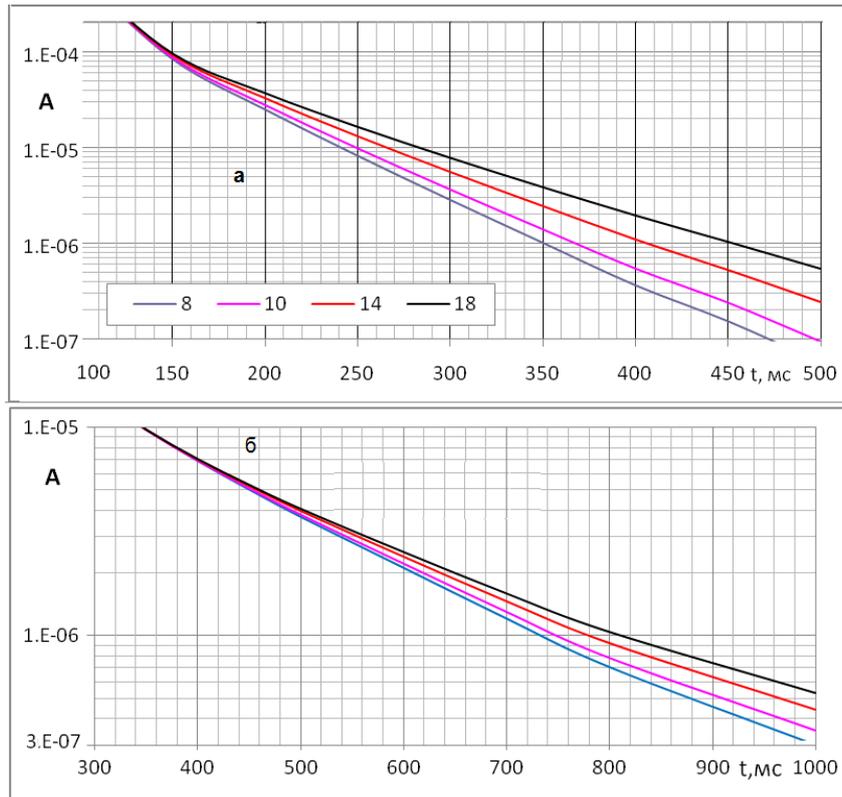


Рисунок 2 – КС для четырехколонной модели, а – № 3, б – № 4.
Шифр кривых – толщина четвертой колонны, мм.

Поскольку μ реальных обсадных колонн лежит в диапазоне 30–60, при классификации дефектов четвертой колонны информативными являются интервалы на КС больше 400 мс. Отметим, что магнитные трубы значительно экранируют сигнал от четвертой колонны, что снижает чувствительность к изменению свойств четвертой колонны. Чувствительность ($\eta=0,9$) при $t=1000$ мс меньше, чем для слабомагнитных труб при $t=500$ мс ($\eta=1,6$).

Изменение магнитных свойств внешней колонны незначительно влияет на постоянную спада и амплитуду КС в интервале 300-1000 мс. В Таблице 2 приведены нормированные амплитуды кривых спада для четырехколонной модели при фиксированных параметрах $\mu_{1-3}, T_{1-3}, T=10$ мм при переменной μ_4 . Для четырехколонной модели в диапазоне времен от 30 до 1000 мс для значений $\mu=30-60$ для обсадных колонн амплитуда кривых КС практически не зависит от μ_4 , максимальное отклонение порядка 2%. Поэтому методика оценки потери металла четвертой колонны допускает использовать алгоритмы, не учитывающие изменения магнитных свойств металла.

Установлено, что изменение магнитной проницаемости металла внешней колонны влияет на характеристики КС (амплитуду, постоянную спада) на более поздних временах КС, чем при изменении толщины этих колонн. На Рисунке 3 приведены результаты расчетов КС для трехколонных моделей. Время регистрации на КС изменения толщины третьей колонны – T_3 начинается на временах t больше 100 мс при $\mu_{1,2}=30, \mu_3=60, T_1=8$ мм, $T_2=10$ мм, а при изменении магнитной проницаемости третьей колонны μ_3 и $T_3 = 10$ мм при

$t > 240$ мс (Рисунок 4). Такие характеристики КС позволили построить методику разделения аномалий магнитных свойств от аномалий потери металла.

Таблица 2 – КС в зависимости от μ_4

t, мС	μ_4					
	30	40	60	80	100	120
300	1.0004	1.0121	1.0262	1.0383	1.0482	1.0674
350	0.6784	0.6868	0.6981	0.7073	0.7149	0.7298
400	0.4823	0.4885	0.4970	0.5040	0.5099	0.5212
450	0.3549	0.3594	0.3658	0.3711	0.3755	0.3841
500	0.2651	0.2685	0.2733	0.2773	0.2806	0.2872
600	0.1542	0.1560	0.1587	0.1610	0.1630	0.1669
700	0.0902	0.0913	0.0928	0.0942	0.0953	0.0977
800	0.0542	0.0548	0.0557	0.0565	0.0572	0.0587
1000	0.0244	0.0246	0.0249	0.0252	0.0255	0.0261

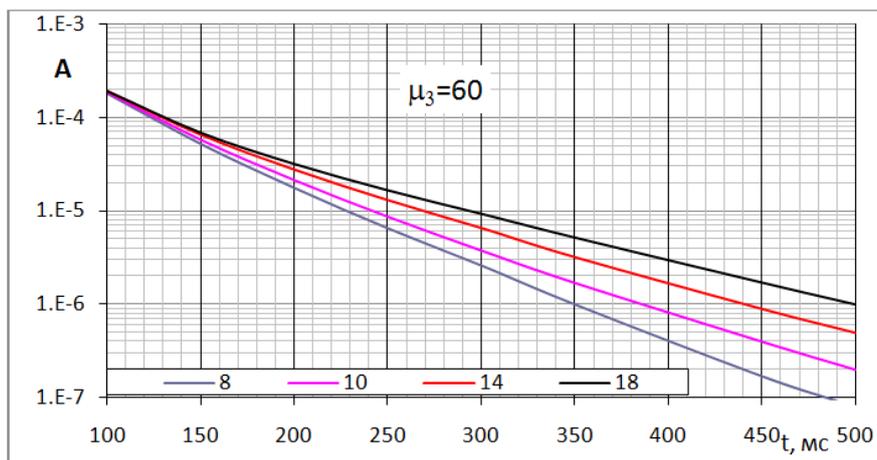


Рисунок 3 – КС для трехколонной модели.

Шифр кривых – толщина стенки третьей колонны (T_3), мм.

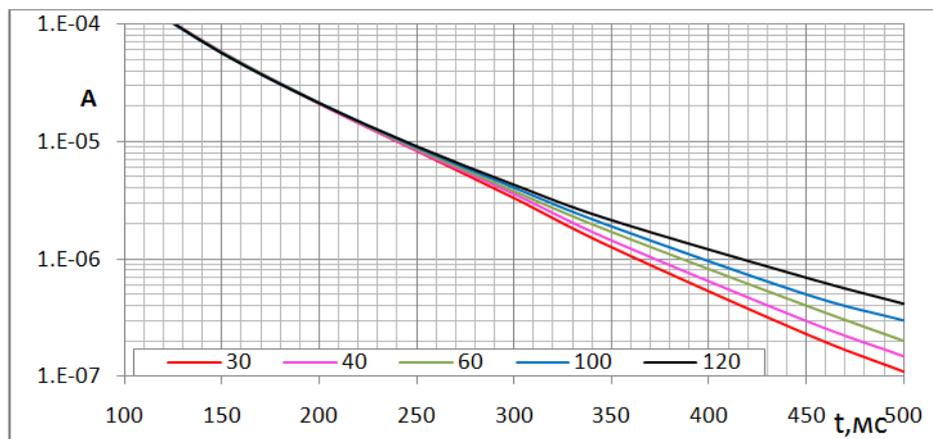


Рисунок 4 – КС для трехколонной модели.

Шифр кривых – магнитная проницаемость третьей колонны (μ_3), отн. ед.

В работе проведена оценка погрешности определения степени коррозии (остаточной толщины) в зависимости от времени регистрации КС на основе анализа матрицы чувствительности (Л.Е. Кнеллер, А.П. Потапов, 2005 г.). Расчеты проводились при абсолютной погрешности измерений 1%.

Рассмотрим окончательные уравнения, связывающие вектор погрешностей определения геометрических и электромагнитных характеристик колонн Δr_j и погрешностей измерений ΔE_i , где $j=1,2,\dots,N$, N – число точек на кривой спада, $i=1,2,\dots,M$, M – число неизвестных:

$$\Delta T = (A^T A)^{-1} A^T \Delta E,$$

A – прямоугольная матрица чувствительности сигналов E . Элемент матрицы A определим как

$$A_{ij} = \frac{\partial E_j}{\partial T_i},$$

где E_j – КС вихревых токов на j -том времени, смоделированных для заданной модели скважины, T – толщина стенки колонны.

В приведённом алгоритме прогнозируемая погрешность определения толщины линейно связана с погрешностью измерений. Расчёты проведены для погрешностей измерений 1%. Если в реальной аппаратуре погрешность измерений будет отличаться от 1%, то результаты вычисления погрешности определения толщины нужно умножить на соответствующий коэффициент.

Для одноколонных моделей большого диаметра ($D_1=508$ мм и $D_2=610$ мм) максимальная погрешность определения степени коррозии $\Delta T_{\max}=5.18\%$ для модели с параметрами $\mu_1=60$, $T=18$ мм, $D_1=508$ мм, минимальная $\Delta T_{\min}=1.41\%$ при $\mu_1=10$, $T_1=8$ мм, $D_1=508$ мм. С увеличением диаметра до 610 мм погрешность ΔT растёт $-\Delta T_{\max}=6.54\%$, $\Delta T_{\min}=1.6\%$. Время регистрации КС для всех моделей $t=100$ мс.

Для двухколонной модели с диаметрами труб $D_1=324$ мм и $D_2=508$ мм максимальная погрешность оценки степени коррозии второй трубы при известных параметрах первой $\Delta T_{\max}=31.98\%$ при $\mu_1=40$, $\mu_2=60$, $T_2=18$ мм, $\Delta T_{\min}=3.46\%$ при $\mu_1=10$, $\mu_2=10$, $T_2=18$ мм, $t=100$ мс.

Если увеличить время регистрации t до 200 мс, то $\Delta T_{\max}=8.13\%$ при $\mu_1=40$, $\mu_2=60$, $T_2=18$ мм, $\Delta T_{\min}=1.2\%$ при $\mu_1=10$, $\mu_2=10$, $T_2=10$ мм.

Для трехколонной модели ($D_1=178$ мм, $D_2=324$ мм и $D_3=508$ мм) нужно увеличить время регистрации до 300 мс. $\Delta T_{\max}=8.6\%$ при $\mu_{1,2}=40$, $\mu_3=60$, $T_3=18$ мм, $\Delta T_{\min}=1.5\%$ при $\mu_{1,2}=10$, $\mu_3=10$, $T_3=18$ мм.

Максимальная погрешность для четырехколонной модели ($D_1=114$ мм, $D_2=178$ мм, $D_3=324$ мм, $D_4=508$ мм) равна 21% при $\mu_{1,2,3}=40$, $\mu_4=60$, $T_5=18$ мм и $t=1000$ мс.

Второе защищаемое положение. Программно-методическое обеспечение определения толщины колонн с учетом изменения электромагнитных свойств металла на основе математического моделирования и итерационного поиска решений с поэтапным усложнением

интерпретационной модели скважины от двух до пяти колонн, с использованием геофизических исследований в скважинах коротким, средним и длинным зондами [2, 4–6, 8, 9, 13].

В России впервые создана аппаратура электромагнитной дефектоскопии МИД-4, МИД – СМ5 (В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, А.П. Потапов, В.И. Шамшин), позволяющая регистрировать сигнал от пяти колонн. Для расчета толщины стенок колонн необходимо было разработать алгоритм и программное обеспечение.

Наряду с толщиной стенки трубы на измеряемый сигнал влияют магнитная проницаемость и электропроводность металла. Эффективная магнитная проницаемость (μ) используемых труб в основном лежит в диапазоне 10–60 отн.ед., а удельная электропроводность в диапазоне от 5 МСм/м до 8 МСм/м. Для слабомагнитных труб μ в диапазоне 10–20, магнитных μ – 20–40 и сильномагнитных μ более 50. Диаметр труб изменяется от 73 мм до 610 мм. Толщина стенки труб может меняться от 5 до 9 мм для 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 интервале колонны попадают единичные трубы либо небольшие интервалы из другой марки стали, чем основная колонна. Поэтому при оценке состояния колонн важно выделить эти интервалы, чтобы исключить возможность ошибки при количественной интерпретации.

Метод вычисления толщины стенки колонн основан на решении обратной задачи путём последовательного поиска решения методом подбора параметров интерпретационной модели, начиная с одноколонной модели, заканчивая пятиколонной.

Задача формулируется следующим образом. Имеем 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 (кривая спада), N – число колонн.

Под измерением понимают значения ЭДС в измерительной катушке, зарегистрированные с шагом квантования по времени Δt . Искомые параметры: μ_j, σ_j, T_j – соответственно магнитная проницаемость, проводимость и толщина j -той трубы. 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.

$$\Psi = \min \left\| \frac{\vec{Y}_k - F(\vec{X})}{\delta \vec{Y}_k + \varepsilon} \right\|, \quad (1)$$

где ε , δ – абсолютная и относительная погрешности измерений.

Основные требования, которые были предъявлены к разрабатываемому алгоритму, – это поиск минимума функционала (1) при слабых начальных приближениях за ограниченное число итераций, которое бы обеспечивало приемлемое для массовой обработки время счета.

Для оперативности поиска решения предложено использовать набор рассчитанных кривых из базы данных (БД) на основе численного решения прямой задачи.

Для создания базы данных, обеспечения точности определения толщины стенок колонн проведена регистрация эталонным прибором кривых спада в аттестованных опорных моделях, имитирующих одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиколонные скважины, рассчитаны кривые спада для математических моделей с шагом по толщине для каждой колонны $\Delta h=0,5$ мм для μ – 10, 20, 30, 40, 50, 80, 150 при $\sigma=3 \cdot 10^6$ мСм/м и $\sigma=7 \cdot 10^6$ мСм/м.

В работе предложен следующий подход к поиску решения. Поскольку мы имеем измерения разноглубинными зондами, целесообразно искать решение последовательным усложнением модели. Это уменьшает размерность обратной задачи на каждом этапе поиска решения и повысит достоверность полученных результатов.

На первом этапе определяются параметры двухколонной модели. Исходные данные – кривые спада короткого зонда 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 колонн известны. Исходные данные – КС длинного зонда на заданном временном интервале.

На третьем этапе определяются параметры пятой колонны при условии, что параметры четырех внутренних колонн известны.

Для тестирования алгоритма по прямой задаче были смоделированы измерения для различных моделей. Затем проводилась инверсия этих кривых с учетом погрешностей в измерениях (2 %). В Таблице 3 приведены результаты определения параметров четырехколонной модели, где индекс "и" обозначает результат вычисления. Максимальное отклонение от модели для четвертой колонны 1.4 мм.

Таблица 3 – Результаты решения обратной задачи для четырехколонной модели:

$T_{\text{НКТ}} = 4$ мм, $T_{\text{ЭК1}} = 12$ мм, $T_{\text{ЭК2}} = 12$ мм, $\mu_{\text{ТК}} = 50$, $\sigma_{\text{ТК}} = 8 \cdot 10^6$ См/м.

$T_{\text{ТК}}, \text{мм}$	$T_{\text{НКТи}}, \text{мм}$	$T_{\text{ЭК1и}}, \text{мм}$	$T_{\text{ЭК2и}}, \text{мм}$	$T_{\text{ТКи}}, \text{мм}$	$\mu_{\text{ТКи}}$	$\sigma_{\text{ТКи}}, \text{МСм/м}$	W
6	4,02	11,7	11,0	7,03	58,3	8,49	0,959
8	3,99	11,9	11,3	9,2	55,8	8,11	0,929
10	3,88	12,2	11,5	11,11	54,8	7,97	0,939
12	3,80	12,4	11,6	13,4	54,2	7,91	0,932

Предложенный алгоритм лег в основу программно-методического обеспечения интерпретации данных аппаратуры МИД-3, МИД-4, МИД-СМ5.

На Рисунке 5 приведены результаты физического моделирования измерений и вычисление толщины стенки для четырехколонной модели (№1 – 180 мм, №2 – 246, №3 – 342, №4 – 430 мм) и пятиколонной модели (№5 – 100 мм, №1, №2, №3, №4).

Для четырехколонной максимальное отклонение результатов расчета толщины в первой гладкой трубе № 1 не превышает 0,1 мм. Во второй трубе № 2 с интервалом уменьшения толщины длиной 600 мм при номинальной толщине максимальное отклонение результатов расчета толщины превышает 0,23 мм, абсолютная погрешность в проточке толщиной 2,0 мм – 0,49 мм. Максимальное отклонение результатов расчета толщины в третьей трубе № 3 с интервалом уменьшения толщины длиной 800 мм при номинальной толщине не превышает 0,45 мм, абсолютная погрешность в проточке 0,15 мм при толщине 7,0 мм. Для четвертой трубы № 4 диаметром 430 мм с интервалом уменьшения толщины длиной 1000 мм при номинальной толщине отклонение результатов расчета толщины не превышает 0,58 мм, в проточке толщиной 5,0 мм абсолютная погрешность 0,49 мм.

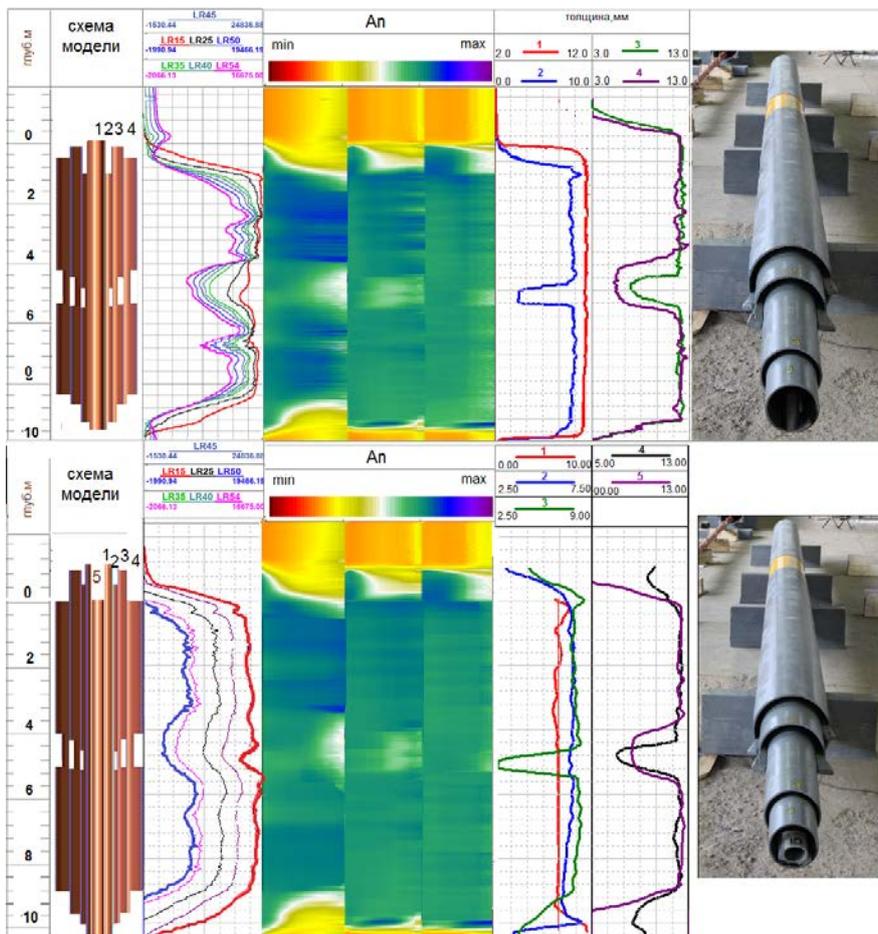


Рисунок 5 – Результаты измерений и вычисление толщины стенки для 4 и 5-колонных моделей; 1, 2, 3, 4, 5 – номера труб, входящих в модель

Для пятиколонной модели максимальное отклонение результатов расчета толщины в первой трубе № 5 не превышает 0,1 мм, а во второй трубе № 1 не превышает 0,23 мм. Отклонение результатов расчета толщины в третьей трубе № 2 не превышает 0,35 мм, в проточке 2,0 мм абсолютная погрешность 0,47 мм. Абсолютная погрешность результатов расчета толщины в четвертой трубе № 3 $D=342$ мм не превышает 0,45 мм, в проточке толщиной 7,15 мм абсолютная погрешность 0,15. Максимальное отклонение результатов расчета толщины в пятой трубе №4 не превышает 0,58 мм, в проточке толщиной 5,41 мм абсолютная погрешность 0,41 мм.

Третье защищаемое положение. *Методика интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии скважин, включающая алгоритм вычисления толщины, базу знаний, сформированную по результатам физического моделирования и оценки технического состояния колонн предыдущих скважинных исследований, позволяет оценивать техническое состояние скважин с пятиколонной конструкцией [1, 2, 4, 5, 7, 9, 12].*

По заданию Управления по подземному хранению газа ПАО «Газпром» АО НПФ «ГИТАС» в 2011 г. разработало Методическое руководство по проведению магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии в газовых и нефтяных скважинах аппаратурой МИД-Газпром и обработке результатов измерений для оценки технического состояния двух колонн. Методика интерпретации реализована в ПО «DeViz» на основе двухколонной модели скважины. Интерпретация данных электромагнитной дефектоскопии ЭМДС и магнитоимпульсной дефектоскопии проводится в системе «Соната».

В период с 2014 по 2020 г. АО НПФ «ГИТАС» и АО НПП «ВНИИГИС» разработана аппаратура электромагнитной дефектоскопии на основе метода переходных процессов МИД-3, МИД-4 и МИД-СМ5, позволяющая исследовать до пяти колонн.

Для обеспечения требуемой для оценки технического состояния точности результатов интерпретации необходимо провести:

1. Измерения эталонным прибором на аттестованных опорных физических моделях, имитирующих одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиколонные скважины.
2. Математическое моделирование КС для опорных моделей, оценить и обеспечить адекватность математических моделей реальным измерениям.
3. Расчет базы данных КС для различной толщины 1-й, 2-й, ..., 5-й колонн с шагом по толщине от 0,05 мм для $\mu=10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 150$ при значениях электропроводности $\sigma=3 \cdot 10^6$ мСм/м и $\sigma=7 \cdot 10^6$ мСм/м.

Для создания эталонных моделей используются аттестованные трубы диаметром от 60 до 600 мм. В настоящее время для создания базы данных и поверки приборов используются 68 моделей, которые включают одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиколонные конструкции, имитирующие дефекты, трещины, потерю металла. Для каждой модели регистрируются кривые спада как функция глубины. При этом формируется по 180 опорных кривых спада для каждого зонда как функции изменения толщины для заданной модели.

На Рисунке 6 приведены примеры измерений кривых спада ЭДС переходных процессов в эталонных моделях. В первом случае (А) измерения проводились в одной, двух, трех и четырех колоннах при условии, что диаметр первой колонны с увеличением числа колонн уменьшается. Вторая модель (Б) имитирует двух-, трех- и четырехколонную скважины при условии, что прибор всегда находится в НКТ.

В базе данных хранится более 30 000 кривых. Входом в БД для считывания кривых является схема скважины. В процессе скважинных исследований накапливается и формируется база знаний, которая включает измеренные на скважинах КС для различных моделей и интервалов с потерей металла, КС и кривые профилирования для подтвержденных дефектов и элементов конструкции, которая используется при последующей интерпретации скважинных данных МИД. На Рисунке 7 приведены примеры теоретических кривых спада для четырехколонных (а, б) и пятиколонных (в, г) моделей. Шифр кривых – толщина внешней колонны, шифр рисунков – магнитная проницаемость труб.

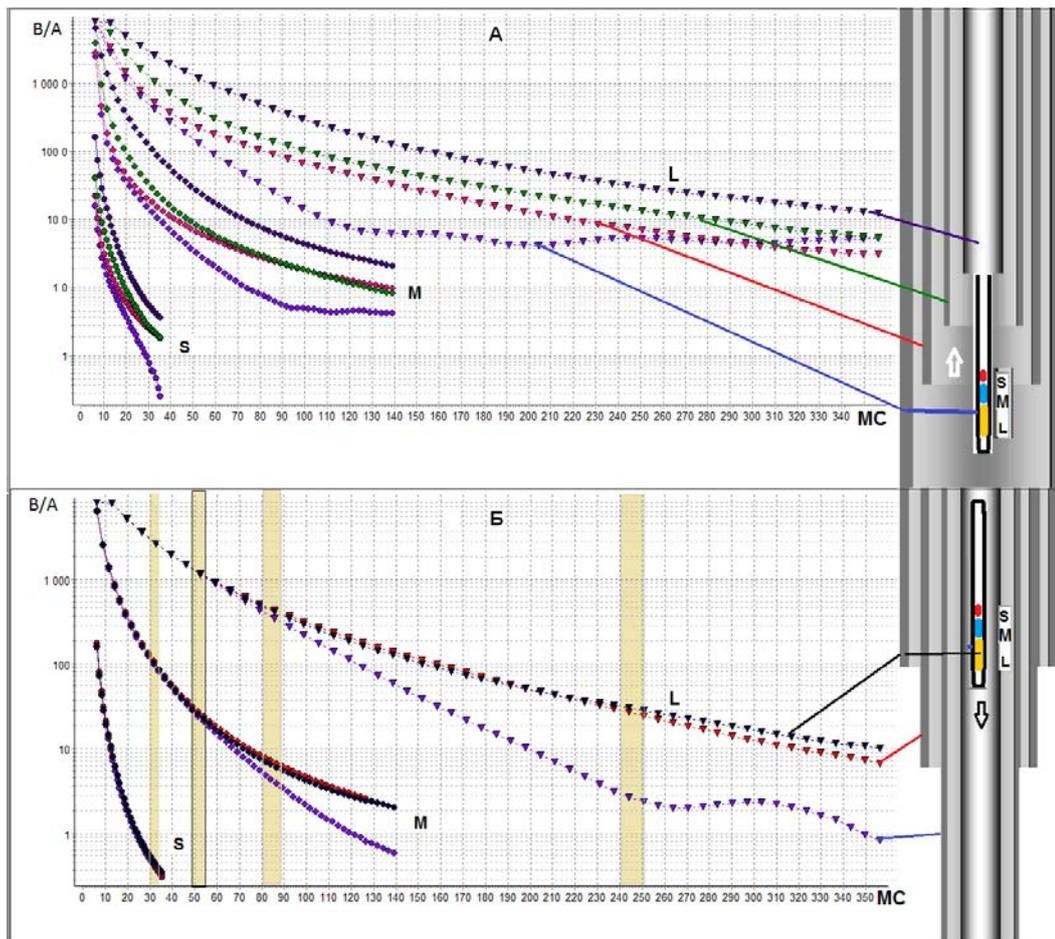


Рисунок 6 – Кривые спада для эталонных моделей; S, M, L – данные короткого, среднего и длинного зондов

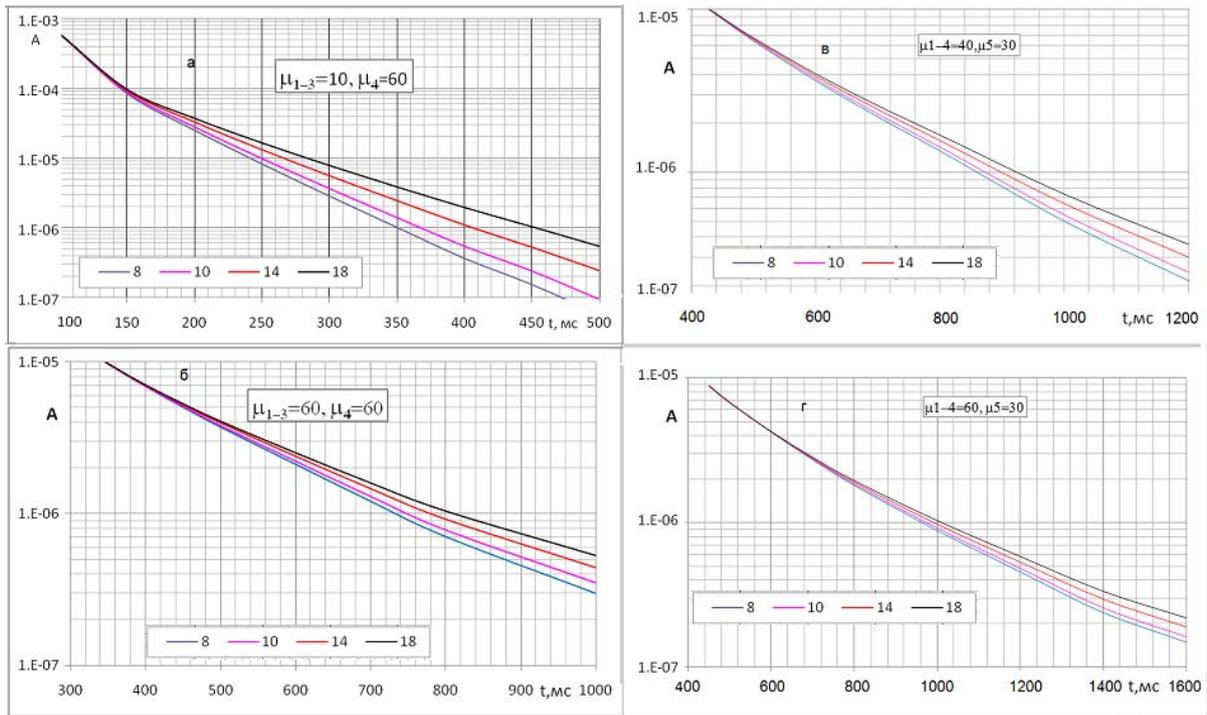


Рисунок 7 – Пример теоретических КС: а, б – четырехколонные модели, шифр кривых – толщина 4-й колонны; в, г – пятиколонные модели, шифр кривых – толщина 5-й колонны

Методика интерпретации основана на алгоритме, приведенном в схеме (Рисунок 8):

1. Построение конструкции скважины по кривым спада и сопоставление с данными паспорта скважины.
2. Уточнение параметров колонн и конструкции на основе базы знаний. Увязка кривых спада по данным ГИС. Автоматическая отбивка муфт и первых трех колонн и ручная для четвертой и пятой колонн. Учет эксцентриситета колонн.
3. Расчет толщины стенки первых двух колонн на основе базы данных для двухколонной модели и измерений короткого и среднего зондов. Расчет толщины третьей, четвертой и пятой колонн на основе базы данных для соответствующих моделей и измерений длинным зондом.
4. Определение дефектов и подтверждение результатов с использованием базы знаний.
5. Формирование таблиц, заключения, планшетов.
6. База данных. Теоретические КС для различных моделей.
7. База знаний. Фактические КС и образы дефектов обработанных ранее скважин.

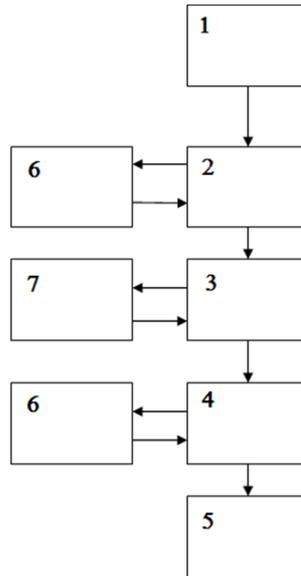


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма интерпретации

В настоящее время методика интерпретации используется при оценке технического состояния нефтегазовых скважин.

На Рисунке 9 приведен пример исследования многоколонной скважины, которая включает: НКТ диаметром $4\frac{1}{2}$ " (1), обсадную вторую колонну диаметром $9\frac{5}{8}$ " (2), обсадную третью колонну диаметром $13\frac{3}{8}$ " (3), обсадную колонну диаметром 20" (5). Проведен расчет толщины (ТНК1, ТНК2, ТНК3) и потери металла (MLD) стенок четырех колонн. В приустьевой зоне обнаружено сквозное нарушение в трубах 20", $13\frac{3}{8}$ " и сильная коррозия в трубе $9\frac{5}{8}$ ".

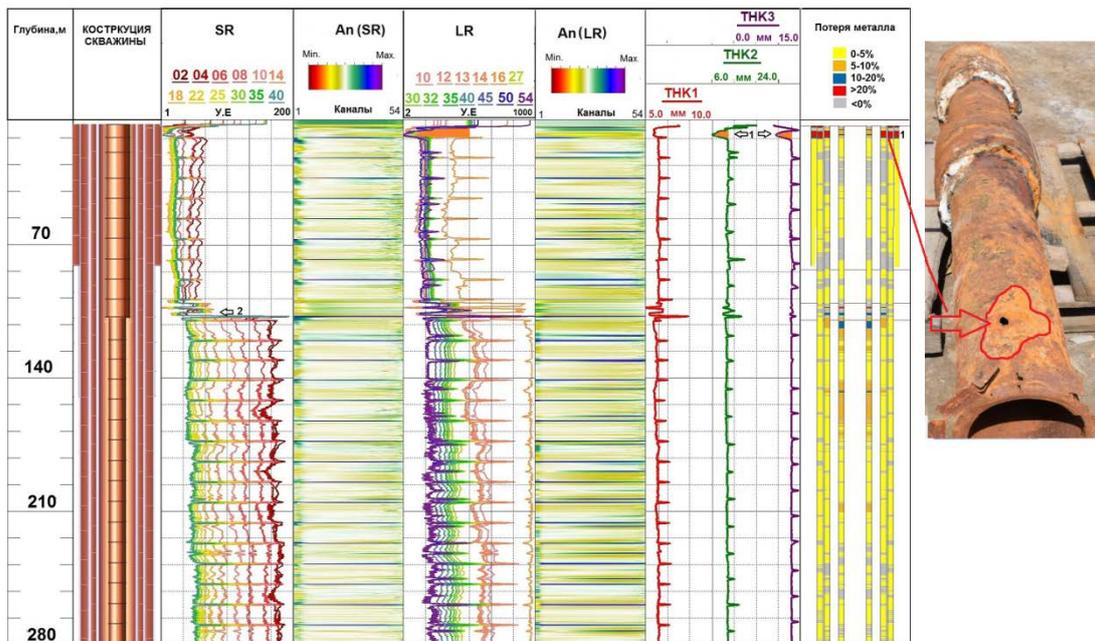


Рисунок 9 – Пример определения толщины трех колонн и нарушения в приустьевой зоне; 1 – дыра в обсадных колоннах 20", $13\frac{3}{8}$ " и коррозия в колонне $9\frac{5}{8}$ "; 2 – изменение диаметра НКТ

На Рисунке 10 приведены кривые спада среднего и глубинного зондов для номинальной толщины труб (1) и в интервале дефекта (2). Опорные кривые спада граничного значения начала переходного процесса в определенной трубе выбираются из базы знаний программного обеспечения. Отметим, что были извлечены трубы и результаты исследований подтвердились.

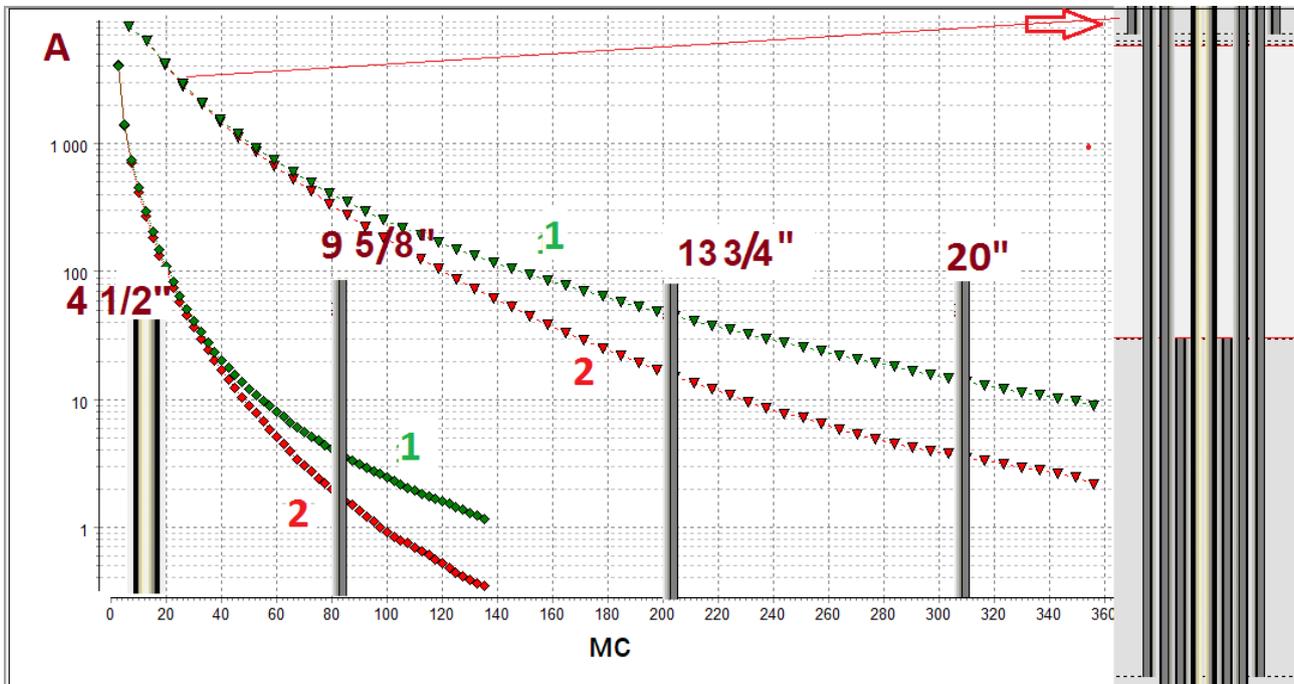


Рисунок 10 – Кривые спада в пристыевой зоне:

1 – для номинальной толщины стенки, 2 – для интервала коррозии

На Рисунке 11 приведены результаты интерпретации в пятиколонной скважине, которая включает: НКТ диаметром $2\frac{7}{8}$ " (1), обсадную первую колонну диаметром 4" (2), обсадную вторую колонну диаметром 7" (3), обсадную третью колонну диаметром $9\frac{5}{8}$ " (4), обсадную четвертую колонну диаметром $13\frac{3}{8}$ " (5). Получены расчеты толщины и потери металла пяти колонн. Определены сквозное нарушение в трубе $13\frac{3}{8}$ " (5) и сильная коррозия в $9\frac{5}{8}$ " (4), что подтверждается кривыми спада (номинал, Деф) и граничными значениями времени ПП для каждой колонны (1, 2, 3, 4, 5) и КС из базы знаний (БЗ).

Методика интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии - толщинометрии используется АО НПП «ГИТАС» при оценке технического состояния нефтегазовых скважин.

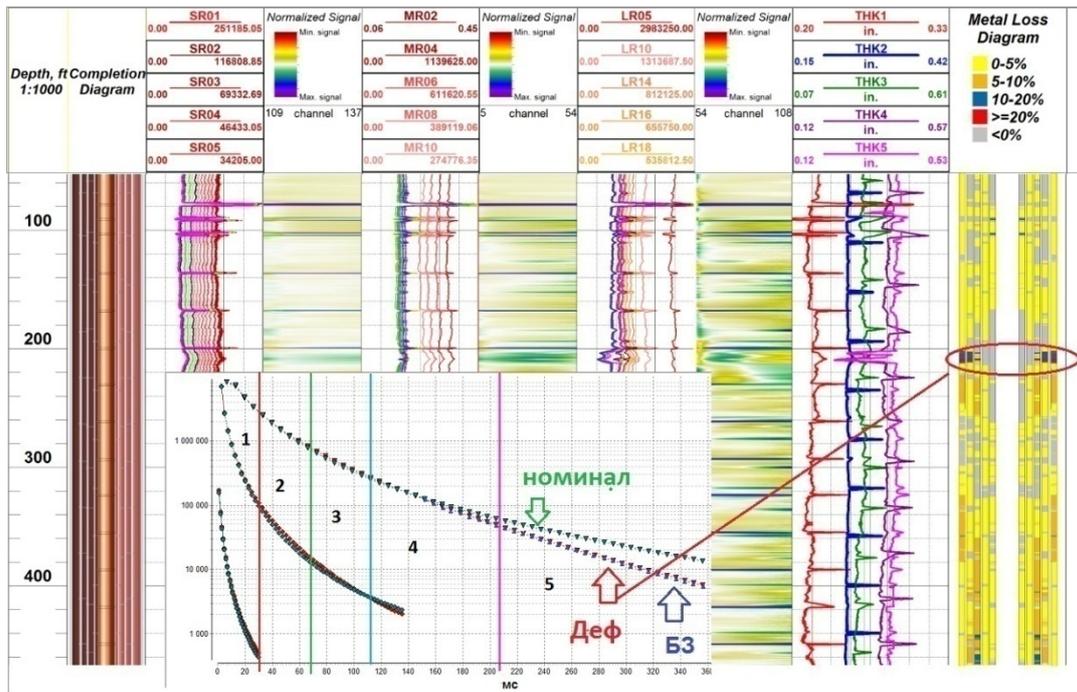


Рисунок 11 – Пример интерпретации в пятиколонной скважине

Заключение

В итоге проведенных работ получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния аппаратуры электромагнитной дефектоскопии многоколонных скважин, методов математического моделирования переходных процессов, алгоритмов определения толщины колонн.

2. Проведено моделирование кривых спада в многоколонных скважинах для различных типовых ситуаций и оценена достоверность определения толщины труб обсадных колонн.

3. Разработан численный алгоритм и программное обеспечение моделирования кривых спада переходных процессов в многоколонных скважинах на основе использования интеграла Фурье, решения уравнения Гельмгольца методом разделения переменных.

4. Предложен алгоритм учёта влияния магнитной проницаемости, удельной электропроводности, геометрии колонны на данные магнитоимпульсной дефектоскопии при числе колонн от двух до пяти.

5. На основе метода математического моделирования и решения обратной задачи создано программное обеспечение интерпретации данных магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии.

6. Предложена методика интерпретации, которая включает алгоритмы вычисления толщины, выявления дефектов с использованием базы знаний, построенной на основе результатов интерпретации предыдущих скважин.

7. Разработанная методика интерпретации проходит опробование на предприятиях ООО «Газпром недра».

Список работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Потапов А.П. Технология оценки технического состояния обсадных колонн магнитоимпульсными дефектоскопами / А.П. Потапов, В.В. Даниленко, В.Н. Даниленко, **Г.И. Головацкая** // НТВ «Каротажник». – 2016. – № 6.(264). – С. 112–134 (вклад автора 30%).
2. Потапов А.П. Оценка дефектов и толщины труб большого диаметра в многоколонных скважинах методом магнитоимпульсной дефектоскопии / А.П. Потапов, **Г.И. Головацкая**, В.В. Даниленко, В.Н. Даниленко, Р.Р. Куйбышев // Газовая промышленность. – 2020. – № 2 (796). – С. 22–30 (вклад автора 25%).
3. Потапов А.П. Новая технология толщинометрии обсадных колонн в многоколонных скважинах на основе метода переходных процессов / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, **Г.И. Головацкая**, Р.Р. Куйбышев, В.И. Шамшин // Каротажник. 2021. – №4 (310). – С. 76–89 (вклад автора 20%).
4. Потапов А.П. Магнитоимпульсное радиальное зондирование и азимутальное сканирования обсадных труб и НКТ многоколонных скважин. / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, **Г.И. Головацкая**, Р.Р. Куйбышев, А.А. Исаева, В.И. Шамшин // Газовая промышленность. – 2022. – № S3 (838). – С. 106–114 (вклад автора 15%).
5. Головацкая Г.И. Методика интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии методом переходных процессов многоколонных скважин / Г.И. Головацкая // Геофизика. – 2023. – № 5. – С. 65–71 (вклад автора 100%).
6. **Головацкая Г.И.** Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия многоколонных скважин методом переходных процессов / Г.И. Головацкая, А.П. Потапов, А.В. Шумилов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – № 3. – С. 238–242 (вклад автора 30%).

Публикации в научных журналах, сборниках статей, индексируемых в РИНЦ

7. **Головацкая Г.И.** Магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия скважин. [Электронный ресурс] / Г.И. Головацкая, А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, Л.Е. Кнеллер // 6th Saint Petersburg International Conference&Exhibition, Санкт-Петербург. 2014 г. Th D 08 (вклад автора 30%).
8. Потапов А.П. Дефектоскопия-толщинометрия обсадных труб нефтегазовых скважин на основе метода переходных процессов / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, Л.Е. Кнеллер, **Г.И. Головацкая** // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2014: сборник трудов Международной научно-технической конференции: в 2т. / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение

высш. проф. образования «Уфимский гос. нефтяной технический ун-т», Фил. УГНТУ в г. Октябрьском. – Уфа : Аркаим, 2014. – Т.1. – С. 152–156 (вклад автора 25%).

9. Потапов А.П. Магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия многоколонных скважин / А.П. Потапов, В.В. Даниленко, В.Н. Даниленко, **Г.И. Головацкая** // Нефть. Газ. Новации. – 2017. – №2. – С. 20–25 (вклад автора 20%).
10. **Головацкая Г.И.** Новая технология оценки технического состояния пятиколонных скважин на основе метода переходных процессов // Модернизация российского геофизического комплекса: материалы XXV научно-практической конференции (ГК «Кандрыкуль», 16 февраля 2021 г.) URL: <https://www.youtube.com/watch?v=aucYBE3y70I>.10.54-22.30 (дата обращения: 17.02.2022) (вклад автора 100%).
11. **Головацкая Г.И.** Методика интерпретации электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии многоколонных скважин методом переходных процессов // Тезисы докладов XXIX научно-практической конференции им. Лаптева В.В. «Новая техника и технологии трудноизвлекаемых запасов углеводородов». 31-я международная выставка «Газ. Нефть. Технологии». Уфа, 23–26 мая 2023 г. С. 43–48 (вклад автора 100%).

Монография

12. Потапов А.П. Магнитоимпульсная технология и аппаратура для дефектоскопии обсадных колонн в газовых скважинах / А.П. Потапов, С.А. Хан, В.Н. Даниленко, В.И. Шамшин, В.В. Даниленко, Г.И. Головацкая, Р.Р. Куйбышев; ПАО «Газпром». – М, 2023. – 150 с. (вклад автора 15%).

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023662911 Российская Федерация. Программа вычисления толщины стенок обсадных труб и НКТ пятиколонных скважин «DeTos400»: заявл. 06.06.2023: опубликовано 16.06.2023 / Потапов А.П., **Головацкая Г.И.**; заявитель АО НПФ «ГИТАС», АО НПП «ВНИИГИС» (вклад автора 50%).