

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН
АО НПП «ВНИИГИС»

На правах рукописи

Головацкая

ГОЛОВАЦКАЯ ГУЛЬНАРА ИШМУХАМЕТОВНА

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

Специальность 1.6.9 – «Геофизика»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шумилов Александр Владимирович

Пермь -2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ-ТОЛЩИНОМЕТРИИ ОБСАДНЫХ КОЛОНН И НКТ... 14	
1.1 Магнитоимпульсные приборы для исследования двух колонн.....	14
1.2 Приборы электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии для исследования труб многоколонных скважин.....	16
1.3 Методы математического моделирования магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии.....	23
1.4 Алгоритмы и программное обеспечение интерпретации данных электромагнитных методов	26
Выводы по главе 1.....	30
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ-ТОЛЩИНОМЕТРИИ МНОГОКОЛОННЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ... 31	
2.1 Физические основы метода.....	31
2.2 Численное решение прямой задачи электромагнитной толщинометрии многоколонных конструкций скважин.....	32
2.3 Оценка влияния геометрии и электромагнитных параметров колонн на кривые спада переходного процесса	38
2.3.1 Одноколонная модель (обсадные колонны большого диаметра)	39
2.3.2 Двухколонная модель.....	46
2.3.3 Трехколонная модель	52
2.3.4 Четырехколонная модель	58
2.3.5 Пятиколонная модель.....	62
2.4 Оценка погрешности определения толщины колонн.....	69
Выводы по главе 2.....	74

3	РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ-ТОЛЩИНОМЕТРИИ МНОГОКОЛОННЫХ СКВАЖИН ...	76
3.1	Алгоритм вычисления толщины стенки труб в многоколонных скважинах ...	76
3.1.1	Формирование базы данных	76
3.1.2	Метод расчёта толщины колонн и результаты тестирования	79
3.2	Методика интерпретации.....	88
3.2.1	Описание аппаратуры серии МИД для исследования многоколонных конструкций скважин.....	88
3.2.2	Описание интерфейса программного обеспечения интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии	90
3.2.3	Методика интерпретации	92
	Выводы по главе 3.....	96
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ.....	97
4.1	Пример оценки технического состояния скважины до и после подъема подвесных колонн	97
4.2	Примеры определения нарушений и толщины стенок колонн.....	111
	Выводы по главе 4.....	120
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
	Список использованных источников	122

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей развития российских газовых и нефтяных компаний в области добычи и хранения углеводородов в настоящее время является значительное снижение затрат на производство. Экономия затрат при эксплуатации месторождений и подземных хранилищ газа (ПХГ) может быть получена за счёт увеличения срока безаварийной работы скважин.

В то же время одной из наиболее актуальных задач является контроль технического состояния обсадных, насосно-компрессорных труб (НКТ) и качества цементного кольца. Отсутствие систематического контроля и своевременного ремонта скважин приводит к ухудшению экологии, потерям и ухудшению характеристик сырья, к высоким материальным затратам на ликвидацию аварий, преждевременному выходу скважин из строя.

Для обнаружения факта и местоположения негерметичности колонн и выявления коррозионных повреждений, грозящих нарушением герметичности скважины в будущем, широко применяется комплекс методов скважинных геофизических исследований, ведущее место среди которых занимает электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия.

Эффективным средством контроля технического состояния обсадных колонн и НКТ является магнитоимпульсная дефектоскопия скважин как один из вариантов электромагнитных исследований. В отличие от акустических, радиоактивных и механических методов она позволяет проводить исследования скважин со сложными многоколонными конструкциями, включая незаглушенные скважины, исключает влияние на измерение отложений на внутренней поверхности стенки труб, а также цементного кольца.

В настоящее время магнитоимпульсная дефектоскопия применяется для оценки остаточного срока службы нефтегазовых скважин и ПХГ, предотвращения возможных аварийных ситуаций в процессе бурения и в процессе капитального

ремонта скважин; используется для решения задач ГИС-контроля (уточнения интервалов перфорации, границ врезов и элементов конструкции, дефектов колонны); позволяет осуществлять контроль щелевой гидropескоструйной перфорации [4–6, 10–13, 17–20, 24, 29, 65–67, 80, 81].

В последние годы нефтегазовые компании проявляют большой интерес к технологиям, позволяющим проводить исследования третьей, четвертой и пятой обсадных колонн [78, 76, 79, 75], включая приустьевой интервал.

Наиболее динамично развивается метод исследования на основе регистрации электродвижущей силы (ЭДС) переходных процессов (ПП) (А.М. Асланян, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, А.П. Зубарев, О.В. Иванов, О.М. Казакова, Л.Е. Кнеллер, А.В. Марков, В.А. Миллер, А.А. Миллер, А.П. Потапов, Д.Ю. Пятницкий, В.А. Сидоров, В.К. Теплухин, А.К. Ткаченко, В.И. Шамшин, А.В. Шумилов, М.И. Эпов и др.), – и это требует создания математического и программного обеспечения.

Актуальность темы. С каждым годом всё более остро стоит задача укрепления топливно-энергетического комплекса России. Поиски, разведка, разработка месторождений проводятся во всё более сложных геологических условиях.

В течение последних 25 лет основное усилие по техническому состоянию 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-й, 4-й 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 колонн (ЭК) и НКТ, 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

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 гидропескоструйной 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 (А.А. Даутов, В.Е. Дубенко, О.Л. Кузнецов, Н.Г. Федорова, С.Б. Свинницкий).

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, 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, 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 интерпретации, 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

- 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.

- 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.

- 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 аппаратурно-методических комплексов МИД-4. С использованием аппаратуры проведено исследование более чем в 200 скважинах: нефтедобывающих, разведочных, газовых, 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

- 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.

- 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, насчитывающей от двух до пяти колонн, с использованием геофизических исследований в скважинах коротким, средним и длинным зондами.

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

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов не раз 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 работ в журналах перечня ВАК, 5 публикаций – в изданиях РИНЦ, а также 1 монография (в соавторстве). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ 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

Автор работы внесла значительный вклад в исследования и разработку технологии интерпретации магнитоимпульсной дефектоскопии.

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.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ-ТОЛЩИНОМЕТРИИ ОБСАДНЫХ КОЛОНН И НКТ

1.1 Магнитоимпульсные приборы для исследования двух колонн

Работы по созданию малогабаритной аппаратуры для зондирования незаглушенных скважин на основе метода переходных процессов в 80-е гг. прошлого столетия проведены во ВНИИГИС под руководством доктора технических наук В.А. Сидорова [51, 53]. Было показано, что метод переходных процессов позволяет при одной геометрии зонда исследовать трубы различных диаметров от НКТ до технических колонн, как в одноколонной, так и в двухколонной компоновке, а методические возможности приборов определяются геометрическими характеристиками зондов, длительностью импульса тока, проходящего через генераторную катушку, временем регистрации, ЭДС индукции вихревых токов.

Основанный на этом принципе прибор ЭМДС-48 был впервые разработан в 1988–1990 гг. (Отчёт по теме «Исследовать возможности одновременного раздельного определения толщин нескольких труб», 1990, № госрегистрации 01.890.0008548). До 1995 г. аппаратура была аналоговой и позволяла регистрировать малое число временных каналов. В 1996 г. была завершена разработка цифрового многоканального комплекса. Появилась возможность фиксировать дефекты во второй, а иногда и в третьей обсадной колонне.

Кроме выделения локальных дефектов появилась возможность определения интегральной толщины стенки колонны. Расчёт толщины стенки колонн проводился по градуировочным кривым.

Чтобы провести оценку характеристик металла обсадных колонн, повысить точность определения фактической толщины стенок трубы с учетом многочисленных помех, необходимо использовать многоканальную аппаратуру. Также это

требует решения множества задач, описывающих физические процессы функционирования аппаратного комплекса.

Для решения этих задач АО НПФ «ГИТАС» разработал дефектоскопы-толщиномеры МИД-К, МИД-Газпром, в состав которых входила телеметрическая система, позволяющая передавать большой объем информации с высокой точностью измерений. Приборы включают осевой зонд Z, два поперечных зонда (X, Y), зонд ГК и термометр [11, 52, 53].

Аппаратура МИД-Газпром, разработанная АО НПФ «ГИТАС» в 2001 г., показала отличный результат на ПХГ в Германии. В ходе испытаний ставилась задача не только оценить техническое состояние колонны НКТ и обсадных колонн, но и провести уточнение фактической конструкции скважины.

Дальнейшему развитию технологии магнитоимпульсной дефектоскопии способствовала совместная работа с аппаратурой Sondex в провинции Сычуань в Китае. Результаты испытаний позволили прийти к важным выводам. Механический профилемер МПТ, входящий в состав комплекса, позволяет определять нарушения на внутренней поверхности первой колонны. МИД-К определяет толщину первой и второй колонн. В Китае проведены совместные измерения МПТ и МИД-К [15, 32, 33, 42].

На дефектоскоп, включающий генераторную катушку с магнитной осью, совпадающей с осью прибора, и не менее трех измерительных катушек с магнитными осями, направленными перпендикулярно оси прибора, АО НПФ «ГИТАС» получил патент [25, 26, 27, 33, 34].

Для исследования обсадных колонн АО НПФ «ГИТАС» был разработан сканирующий прибор МИД-СК-100. Комплекс оснащен толщиномером двух колонн и двенадцатью азимутальными зондами для выявления нарушений в стенке колонны [41, 47].

АО НПП «ВНИИГИС» и ООО «Литосфера» разработали цифровую аппаратуру ЭМДС-ТМ-42 и ЭМДС-Т-МП [55, 62, 63] с большой детальностью регистра-

ции переходного сигнала. ЗАО НПП ГА «Луч» создало электромагнитный дефектоскоп, позволяющий формировать импульсы зондирующего тока суммарной величиной 6А при длительности импульса от 3,75 до 7,5 мс в трех вариантах задания конфигурации зондирующего магнитного поля: дифференциальное, полное слабое, полное сильное [69, 72]. Аналогичная аппаратура АМИД-42 разработана в НГУ «Татнефтегеофизика». Система создана на базе ЭМДС-42 и включает в себя термометр и модуль ГК, осевой зонд, два поперечных зонда [17]. Для работы приборами на металлической проволоке создана автономная система МИД-А [39, 54].

В ООО «Оренбургеофизика» разработана аппаратура ЭМДС-И [14]. В отличие от ЭМДС-ТМ-42 [55–60, 62] она обеспечивает передачу спада ЭДС осевого зонда более детально, время регистрации увеличено до 300 мс.

Разработанный АО НПП «ВНИИГИС» многоэлементный (азимутальный) электромагнитный дефектоскоп ЭМДС-С диаметром 112 мм предназначен для выявления дефектов в обсадных колоннах и определения толщины стенок обсадных труб диаметром 146 мм и 168 мм [58, 61].

Дефектоскоп ЭМДС-С позволяет получить значительный объем информации, детально сканировать конструкцию скважины, определить толщину стенки колонны по нескольким образующим и осредненную по окружности, не только выявить дефекты колонны, но и определить их форму и размеры, выявить и определить местоположение зоны перфорации отверстий как сверлящей, так и кумулятивной перфорации [30].

1.2 Приборы электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии для исследования труб многоколонных скважин

Внедрение технологии МИД на месторождениях стран Ближнего Востока потребовало дальнейшего развития теории, совершенствования методики интерпретации результатов исследований и разработки аппаратуры для исследования многоколонных скважин, обсаженных трубами большого диаметра [30].

АО НПФ «ГИТАС» получил патент на способ электромагнитной дефектоскопии в многоколонных скважинах. В основе нового комплекса лежит принцип, при котором через генераторную катушку пропускаются импульсы разной длительности. Короткие импульсы создают электромагнитное поле в ближней зоне, с увеличением длительности импульса поле распространяется в более дальние от оси скважины трубы. Такой принцип возбуждения электромагнитного поля в многоколонных скважинах позволил повысить качество интерпретации за счет более надежного разделения сигналов от разных колонн. Проведены исследования по оценке возможностей метода переходных процессов для реализации технологии, позволяющей проводить дефектоскопию-толщинометрию трех-, четырех- и пятиколонных незаглушенных и заглушенных скважин после подъема НКТ [28, 35–37, 43, 44]. Разработана аппаратура МИД-3К, МИД-4К, МИД-СМ5. МИД-4К включает зонд ГК, датчик давления, блок электроники, зонд ближней зоны, зонд промежуточной зоны, зонд дальней зоны; в МИД-3К нет зонда ближней зоны. В таблице 1.1 даны основные технические данные, метрологические характеристики приборов.

Диапазон измерений приборов МИД: МИД-3К может измерять три барьера количественно и определять наличие/отсутствие четвертого барьера; МИД-4К может измерять четыре барьера количественно и определять наличие/отсутствие пятого барьера; МИД-СМ5 позволяет измерять пять барьеров количественно.

Разработанный комплекс аппаратуры ЭМДС-3 с повышенной глубиной исследований включает гамма-блок, термометр, зонды электромагнитной дефектоскопии и высокоточный кварцевый манометр. Программное обеспечение позволяет рассчитывать толщину стенок первой, второй и третьей колонн обсадных труб диаметром до 340 мм. Эффективность применения комплекса аппаратуры и методики интерпретации результатов исследования доказана при изучении технического состояния нефтяных и газовых скважин на месторождениях Омана [21, 22]. В таблице 1.2 приведены технические характеристики ЭМДС-3.

Таблица 1.1. Основные технические и метрологические характеристики аппаратуры серии МИД для многоколонных скважин

	МИД-3К	МИД-4К	МИД-СМ5
Наименование параметра	Значение	Значение	Значение
Максимальное давление, Мпа	100	100	100
Диапазон рабочих температур, °С	-10–150	-10–150	-10–150
Диаметр скважинного прибора, мм	42	42	42
Длина модуля (с центраторами), мм, не более	3 800	6 735	9 050 7 450
Применяемый каротажный кабель, количество жил	1–7	1–7	1–7
Длина одножильного кабеля, м, не более	7 000	7 000	7 000
Потребляемая мощность, Вт, не более	15	30	70
Потребляемый ток, мА, не более			350
Вес скважинного прибора, кг, не более	15	26,3	35,3
Количество зондов	2 (средний, длинный)	3 (короткий, средний, длинный)	3 (короткий, средний, длинный)
Количество азимутальных секторов сканирования, не менее	–	–	6
Максимальное количество исследуемых обсадных колонн	3	4	5
Максимальный диаметр исследуемых труб, мм	349	508	610
Минимальный внутренний диаметр исследуемых труб, мм	52	52	52
Максимальная толщина стенки колонны труб, мм	16	16	16
Максимальная суммарная толщина колонны труб, мм	41	46	50
Погрешность определения толщины стенки трубы от номинальной толщины, %, не более:			
первой трубы	5	5	5
второй трубы	10	10	10
третьей трубы	15	15	15
четвертой трубы	–	20	20
пятой трубы	–	–	25
Минимальная протяженность выявляемого дефекта типа «трещина» вдоль оси трубы, (D – диаметр трубы), не более:			
первой трубы	$\pi D/15$	$\pi D/15$	$\pi D/15$
второй трубы	$\pi D/7$	$\pi D/7$	$\pi D/7$
третьей трубы	$\pi D/3$	$\pi D/3$	$\pi D/3$
четвертой трубы	–	$\pi D/2,5$	$\pi D/2,5$
пятой трубы	–	–	$\pi D/2$

Таблица 1.2. Технические характеристики ЭМДС-3

Внешний диаметр, мм	42
Длина, мм	2 400
Кабель	одножильный
Максимальное гидростатическое давление, МПа	100
Максимальная рабочая температура, °С	175
Абсолютная погрешность измерения температуры, °С	1
Разрешающая способность, °С	0.01
Диапазон измерений интенсивности естественного гамма-излучения, мкр/час	3–100
Внешний диаметр исследуемых труб, мм	62–340
Суммарная толщина стенок трёх исследуемых труб, мм	30
Погрешность определения толщины стенки трубы, %: для одноколонных конструкций для многоколонных конструкций	5 10
Минимальная протяженность выявляемого дефекта типа трещины вдоль оси трубы, мм в первой (внутренней) трубе во второй трубе в третьей трубе	1/9 1/4 1/2

На основе технологии, применяемой в комплексе ЭМДС-3, фирма Gowell разработала модификации электромагнитных дефектоскопов толщиномеров: MTD43C-B – работает только на кабеле, MTD43C-C – автономный прибор с внутренней памятью, MTD43C-E – работает на кабеле и автономно [82]. В таблице 1.3 приведены технические характеристики аппаратуры.

TGT Oil and Gasservices получен патент на способ электромагнитной дефектоскопии многоколонных скважин [74], в основу которого лег патент АО НПФ «ГИТАС». Отличие способа заключается в использовании нескольких зондов разной длины.

Таблица 1.3. Характеристики аппаратуры MTD

Первая колонна (А)	
Максимальная толщина стенки	25,4 мм
Точность определения толщины	0,16 мм
Минимальный размер дефекта А-труб ($2\frac{7}{8}$ "	12 мм
Вторая колонна (В)	
Максимальная толщина двух колонн	25,4 мм
Точность определения толщины стенки	0,46 мм
Минимальный размер дефекта ($2\frac{7}{8}$ " + 7"	38 мм
Третья колонна (С)	
Максимальная толщина стенки	25,4 мм
Точность определения толщины	1,52 мм
Минимальный размер дефекта ($2\frac{7}{8}$ " + 7" + $13\frac{3}{8}$ "	76 мм
Длина зонда	53, 52 см

На основе патента разработана серия автономной аппаратуры EMPLUSE с внутренней памятью. Прибор включает два независимых модуля: EMPLUSE-1 для работы в двухколонных интервалах скважины; EMPLUSE-2 позволяет исследовать третью и четвертую колонны. Модули можно использовать в одной связке. В таблице 1.4 приведены технические характеристики EMPLUSE.

EM-Pipe-Scanner (Schlumberger) – прибор электромагнитных исследований обсадной колонны – проводит четыре типа измерений [77]:

- Передатчик (T_z) излучает электромагнитное поле с тремя частотами, а двумя приемниками (R_z) измеряется импеданс (Z), зависящий от электромагнитных характеристик обсадной трубы. Значение измеряемого импеданса в большой мере зависит от безразмерной величины $\tau = 1/(\mu_0 i D) \sqrt{\mu/(\sigma \omega)}$, являющейся функцией внутреннего диаметра (ID), угловой частоты ω и электромагнитных свойств металла самой трубы (проницаемости μ и проводимости σ). Величина μ_0 – постоянная величина проницаемости пустого пространства.

Таблица 1.4 Характеристики EMPLUSE

Температура	0–150 °С
Давление	100 мПа
H ₂ SO ₄	<30%
Материал кожуха	Титан
Максимальная толщина стенки одиночной трубы	16 мм
Максимальная определяемая толщина стенок двух барьеров	25 мм
Максимальная определяемая толщина стенок 3 барьеров	38 мм
Максимальная определяемая толщина стенок 4 барьеров	63,5 мм
Погрешность определения толщины стенки:	
- первой колонны (3 1/2")	3,5%
- второй колонны (9 5/8")	6%
- третьей колонны (13 3/8")	12%
- четвертой колонны (20")	30%
Внешние диаметры исследуемых колонн:	
- первой колонны	50–512 мм
- второй колонны	114–512 мм
- третьей колонны	178–512 мм
- четвертой колонны	340–512 мм
Рекомендуемая скорость каротажа	2–6 м/мин

- Регистрируя низкочастотный сигнал (передатчик T_L располагается посередине прибора, а приемники R_{LL} , R_{LS} находятся над и под самим передатчиком), устройство позволяет определять среднюю толщину стенки трубы с поправкой на скин-слой. Два оставшихся измерения представляют двухмерное изображение трубы: прибор получает эти данные, прижимая 18 рычагов к внутренней поверхности трубы. При первом измерении используется низкочастотный сигнал (T_L) для получения двухмерного изображения толщины стенки, при втором – высокочастотный передатчик с дискриминаторным фильтром (T_h), расположенным на самом приборе, генерируя сигнал, не проникающий сквозь толщину стенки трубы, создает двухмерное изображение, разделяя дефекты внешней и внутренней поверхности. Изменение в геометрии металлического объекта, например толщины или диаметра, приведет к передаточному импедансу, вызванному потоком внутри обсадной трубы.

- Метод, основанный на изучении гармонического сигнала, позволяет исследовать коррозию в трёх колоннах.

- Недостатком метода является сложность разделения сигналов от различных колонн. Как правило, определяется толщина первой колонны и суммарная толщина второй и третьей колонны. В таблице 1.5 приведены технические характеристики.

Таблица 1.5. Характеристики прибора EM-Pipe-Scanner

Максимальная рабочая температура	150 °С
Давление	103 МПа
Минимальный диаметр колонн	2 ⁷ / ₈ " (iD>2,313 in)
Максимальный диаметр колонн при определении толщины	13 ³ / ₈ "
Диаметр прибора	2,125" (54 мм)
Число прижимных датчиков	18
Максимальный диаметр раскрытия	9 ⁵ / ₈ "
Длина прибора	6 м
Вес	50 кг
Метрологические характеристики	
Максимальная суммарная толщина колонн	38,1 мм
Точность определения: внутреннего диаметра толщины	±0,05 in 15%
Скорость каротажа: двухколонная конструкция	1000 м/час
Обзорная информация: стандартные исследования высокое разрешение	549 м/час 91 м/час

Фирмой Halliburton был разработан электромагнитный прибор для точной оценки коррозии в пяти вложенных трубах (EXP-V). В работе [76] подробно описаны принципы работы и методология алгоритмов, используемых для обработки данных этого прибора.

Прибор EXP-V использует принцип вихревого тока и включает в себя два передатчика и восемь приемников. Он работает в режиме непрерывной волны на

нескольких частотах. Оптимизированные расстояния между передатчиком и приемником и многочастотная работа обеспечивают достаточно разнообразную информацию, чтобы помочь оценить потерю металла в каждой отдельной трубе для широкого спектра конфигураций.

Характеристики прибора были проверены на синтетических и фактических данных с использованием контролируемых испытаний и экспериментов. Эти тесты продемонстрировали точное определение позиций дефектов и потерь металла в каждой отдельной трубе с несколькими конфигурациями. Для проверки широкого диапазона применения прибора использовались синтетические тесты. В таблице 1.6 приведены технические характеристики аппаратуры.

Таблица 1.6. Характеристики аппаратуры EPX-V

Длина прибора	5,18 м
Диаметр	42,93 мм
Вес	39,46 кг
Максимальное давление	103 МПа
Максимальная температура	176 °С
Диапазоны измерений: минимальный диаметр трубы максимальный диаметр трубы максимальная суммарная толщина стенок	60,45 мм 609,6 мм 63,5 мм
Точность определения толщины: первой трубы общая толщина до 3 труб (1,2 in) общая толщина до 4 труб (1,8 in)	0,38 мм 7% 10%
Максимальная скорость	4,57 м/мин

1.3 Методы математического моделирования магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии

Для обеспечения математического моделирования получено решение прямой задачи распространения электромагнитного поля в коаксиально-цилиндрических магнитных средах (АО НПП «ВНИИГИС») [30, 31, 37, 41].

Для определения неустановившегося процесса в коаксиально-цилиндрической среде предложен спектральный подход, основанный на применении интеграла Фурье [16].

При возбуждении поля ступенчатой функцией тока:

$$J(t) = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

имеем

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{i\omega} d\omega, \quad (1.2)$$

где $h(\omega)$ – магнитное поле на оси скважины, выраженное в единицах поля магнитного диполя в воздухе [7, 8, 9, 42].

Из выражений (1.2) получим окончательные формулы для расчета z и r компонент магнитного поля:

$$h_z(\omega) = h_z^0(k_0, L) - \frac{L^3}{\pi} \int_0^{\infty} \lambda_0 C_0 I_0(\lambda m) \cos \lambda L dm, \quad (1.3)$$

где $h_z^0(k_0, L)$, z - компонента электромагнитного поля в однородной среде с удельной проводимостью σ_0 ;

$\lambda_0 = \sqrt{\lambda - k_i^2}$; C_0 – определяется из рекуррентных формул [30].

В [64, 68, 73] приведен приближенный способ, основанный на замене реальной модели системой проводящих пленок для труб с малой магнитной проницаемостью.

Для азимутальной компоненты для нестационарного электрического поля в одной цилиндрической пленке получено выражение

$$E = \frac{JR_k \mu_0}{\pi m_1 r_1^2} \int_0^N I_1(r_k x) \frac{I_1(\bar{r}x)}{I_1(x)} \exp(-t / m_1 r_1 I_1(x) R_1(x)) \cos \bar{r}x dx, \quad (1.4)$$

где $m_1 = \mu_1 S_1$, μ_1 – магнитная проницаемость, S – интегральная электропроводность пленки, R_k – радиус катушки, r – радиус диполя, $I_1(x)$, $R_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя-Макдональда.

Рассмотрим решение прямой задачи для токового контура на оси металлического цилиндра [70–72].

Учитывая симметрию задачи, домыслим уравнение Максвелла для компонент поля, отличных от нуля:

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{\partial H_r}{\partial r} = \sigma E_\varphi, \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = \mu H_r, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi) = -\mu H_z, \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_z) + \frac{\partial H_r}{\partial z} = 0 \quad (1.7)$$

Используя Фурье-преобразование, получим

$$\begin{aligned} \lambda R - Z'_r &= \sigma F \\ -\lambda F &= \mu R \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r R) = \lambda Z \quad (1.8)$$

Для нормальной по отношению к поверхности раздела компоненты R из (1.8) получено уравнение

$$R''_{rr} + \frac{1}{r} R'_r - \frac{1 + \lambda^2 r^2}{r^2} R = \mu \sigma R \quad (1.9)$$

и граничные условия $-\mu R = 0$, $[R + rR'_r] = 0$, $r = r_1$, $r = r_2$.

Задача (1.9) решается методом А.Н. Тихонова. Функция R представляется в виде суперпозиции $R = X(r) \cdot e^{\lambda t}$, где X удовлетворяет краевой задаче

$$r^2 X''_{rr} + 2X'_r + (m_i^2 r^2 - 1)X = 0,$$

$$[\mu X] = 0, \quad [X + rX'_r] = 0,$$

$$m_i^2 = \alpha \mu_i \sigma_i - \lambda^2, \quad i - \text{номера цилиндров.}$$

Согласно теории задачи Штурма-Луивилля

$$R = \sum_{j=0}^N C_j X_j(r m_j) e^{\alpha_j t}.$$

Коэффициенты C_j должны быть определены так, чтобы удовлетворялось начальное условие

$$R(r) = \sum_{j=0}^N C_j X_j(r) e^{\alpha_j t} \Big|_{t=0}.$$

Решая (1.8) и (1.9), определяют ЭДС в приемном контуре r , расположенном на оси цилиндра, при возбуждении выключенным током амплитудой J в питающем контуре r_k :

$$\varepsilon = 2J\mu_1 r r_k \int_0^\infty \frac{I(r_1 \lambda) I_1(r \lambda) \cos(\lambda z)}{I_1(\lambda r)} \sum_{j=0}^N C_j \alpha_j (m_j r_j) e^{-\alpha_j t} dt.$$

Как показано в [71], при численной реализации возникают проблемы из-за медленной сходимости ряда. Поэтому на ранних временах в этом случае для вычисления неустановившихся процессов целесообразно использовать спектральный подход [38, 40, 42].

1.4 Алгоритмы и программное обеспечение интерпретации данных электромагнитных методов

Известны различные пути определения толщины стенки обсадной колонны. В работе [23] приведен экспресс-метод оценки толщины стенки колонны на основе эмпирической формулы, описывающей ЭДС, наведенную в трубах:

$$E(t) = A \exp(-t\alpha/S), \quad (1.10)$$

где S – продольная проводимость, A – некоторый коэффициент.

Задавая α , полученным на основе решения прямых задач для заданных моделей, определяют толщину как

$$m = \alpha E(t) / E'(t).$$

Данный метод не позволяет учитывать изменение электромагнитных свойств металла и ограничен одноколонной моделью.

Вычисление толщины стенки труб в [22] проводится по приближенным формулам. Формулы настраиваются по модельным, теоретическим, скважинным исследованиям.

В [70] приведен алгоритм решения обратной задачи электромагнитной дефектоскопии колонн, основанный на разложении экспериментальной ЭДС в ряд Тейлора в окрестности теоретической ЭДС, соответствующей базовой модели:

$$E_3 = E_0 + \frac{\partial E_0}{\partial r_1}(r_1 - r_{1,0}) + \frac{\partial E_0}{\partial r_2}(r_2 - r_{2,0}) + \frac{\partial E_0}{\partial \mu}(\mu - \mu_0), \quad (1.11)$$

где $E_3 = E(t_k, r_1, r_2, \mu)$ – значение ЭДС, измеренной в момент t_k ;

r_1, r_2, μ – неизвестные параметры модели;

$E_0 = E_0(t_k, r_{1,0}, r_{2,0}, \mu_0)$ – теоретические значения ЭДС для модели с параметрами $r_{1,0}, r_{2,0}, \mu_0$.

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

После преобразований (1.10) получена система уравнений относительно трех неизвестных:

$$A_1(t_k)x_1 + A_2(t_k)x_2 + A_3(t_k)x_3 = B(t_k),$$

где A_1, A_2, A_3, B – известные коэффициенты,

x_1, x_2, x_3 – искомые параметры.

Решение системы (1.11) методом наименьших квадратов дает решение в виде:

$$r_1 = x_1 r_{1,0}, \quad r_2 = x_2 r_{2,0}, \quad \mu = x_3 \mu_0$$

Решая прямую задачу для этих значений, можно дальше уточнять параметры модели. Построено итерационное решение обратной задачи. Для синтетических данных приведен анализ сходимости процесса. Метод опробован на экспериментальных данных.

В АО НПП «ВНИИГИС» разработан алгоритм решения обратной задачи на основе вычисления матрицы производных и итерационного поиска параметров μ ,

σ , T [34, 35, 36]. Проведен анализ максимально прогнозируемой погрешности определения нескольких параметров для одно- и двухколонной моделей.

ПО DeViz включает интерфейс для редактирования каротажных данных в интерактивном режиме на экране монитора. Привязка кривых проводится по данным ГИС других методов, по конструкции скважины. Определение положения муфт проводится в автоматическом режиме с возможностью “ручной” корректировки, учета магнитного шума, эксцентриситета труб и температурного дрейфа.

Для оценки качества материала, выявления аномальных зон, построения конструкции скважины, уточнения интервалов перфорации, определения интервалов нарушения колонны и коррозии строятся трехмерные дефектограммы. По оси Z откладывается глубина, по оси X – номер временной задержки, по оси Y – амплитуда дефектограммы.

Амплитуда дефектограммы рассчитывается как

$$D(z_j) = \frac{E_i - E_i(z)}{P_i},$$

где $E_i(z)$ – ЭДС на i -ой временной задержке на глубине z ,

$$P_i = \int_{z_k}^{z_n} E_i(z) dz, \text{ где } z_k, z_n \text{ – соответственно координаты кровли и подошвы.}$$

Учет эксцентриситета производится на основе прямого и обратного преобразования Фурье, суть которого заключается в анализе частотного спектра и исключения низкочастотных составляющих, обусловленных эксцентриситетом труб.

Учитывая магнитную неоднородность, можно повысить точность определения толщины.

Для повышения точности определения толщины в таких ситуациях, когда нет возможности оценить μ и σ труб, предложен следующий алгоритм.

В пределах интервала между муфтами труб задаются постоянными μ и σ . Задача вычисления толщины стенки решается в следующей постановке. Имеем вектор измерений

$$\mathbf{Y} = \{Y_{ji}\} \quad (j = 1, \dots, N, \quad i = 1, \dots, M),$$

где N – число точек в заданном интервале;

M – число измерений в j -ой точке.

Определим вектор искомых параметров:

$$\mathbf{P} = \{m_1, m_2, \dots, m_N, \sigma, \mu\},$$

где m_j – толщина трубы в j -ой точке;

σ, μ – соответственно электропроводность и магнитная проницаемость интервала.

Искомые параметры определим из условия минимизации функционала:

$$\psi = \min \left\| \frac{\mathbf{Y} - \mathbf{Z}}{\mathbf{Y} \delta + \varepsilon} \right\|, \quad \mathbf{Z} = \{Z_{ji}\} \quad (1.12)$$

где \mathbf{Z} – измерения, смоделированные по прямой задаче;

ε, δ – соответственно абсолютная и относительная погрешности измерений.

Задача (1.12) решается на основе итерационного алгоритма, приведенного в [39]. Матрица производных имеет вид

$$\mathbf{A} = \frac{\partial Z_{ji}}{\partial m_j} + \frac{\partial Z_{ji}}{\partial \mu} + \frac{\partial Z_{ji}}{\partial \sigma} \quad (j = 1, \dots, N, \quad i = 1, \dots, M).$$

Таким образом, удается уменьшить размерность задачи, повысить точность определения толщины и оперативность обработки. Данный алгоритм позволяет определять толщину двух колонн.

В 2003 г. по заказу АО «Газпром» было разработано Методическое руководство по проведению магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой МИД-Газпром и обработке результатов измерений [11].

Gowell предлагает ПО интерпретации результатов измерений аппаратурой MTD [82] в платформе MPSIPro. Процесс инверсии данных проводится по следующему алгоритму:

- задаются номинальные размеры труб;
- используется таблица базы данных, рассчитанных для определенных моделей скважин;
- параметры труб определяют на основе итерационного поиска, критерием которого является минимальное расхождение фактических и теоретических КС.

TGT представила алгоритм определения толщины для 3-колонной модели, который включает расчет откликов для различных параметров труб, определение удельной электропроводности и магнитной проницаемости и вычисление толщины колонн.

Определение этих параметров производится сопоставлением экспериментальных и модельных откликов. Сравнение производится по критерию минимума суммы квадратов относительных отклонений реального спада от модельного. Качество аппроксимации экспериментального спада y_i модельным спадом \hat{y}_i оценивается в этом случае следующей функцией ошибки [30]:

$$\Psi = \min \left\| \frac{\bar{Y}_k - F(\bar{X})}{\delta \bar{Y}_k + \varepsilon} \right\|.$$

Выводы по главе 1

- Малогабаритные приборы для электромагнитной дефектоскопии-толщинометри и для незаглушенных скважин условно разделяются на для исследования двухколонных и многоколонных скважин
- В настоящее время значительно развита теория и методы моделирования для моделей сред достаточно сложной геометрии, что позволяет рассчитывать на разработку эффективных алгоритмов интерпретации данных магнитоимпульсной дефектоскопии многоколонных скважин.
- Алгоритмы интерпретации в основном базируются на методах оптимизации и математического моделирования.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ- ТОЛЩИНОМЕТРИИ МНОГОКОЛОННЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1 Физические основы метода

Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия основана на регистрации приемными катушками ЭДС взаимной индукции переходных процессов вихревых токов (J), наведённых в колоннах труб после прохождения импульсов тока различной длительности через генераторные катушки (рисунок 2.1) [1–4, 36, 45, 48].

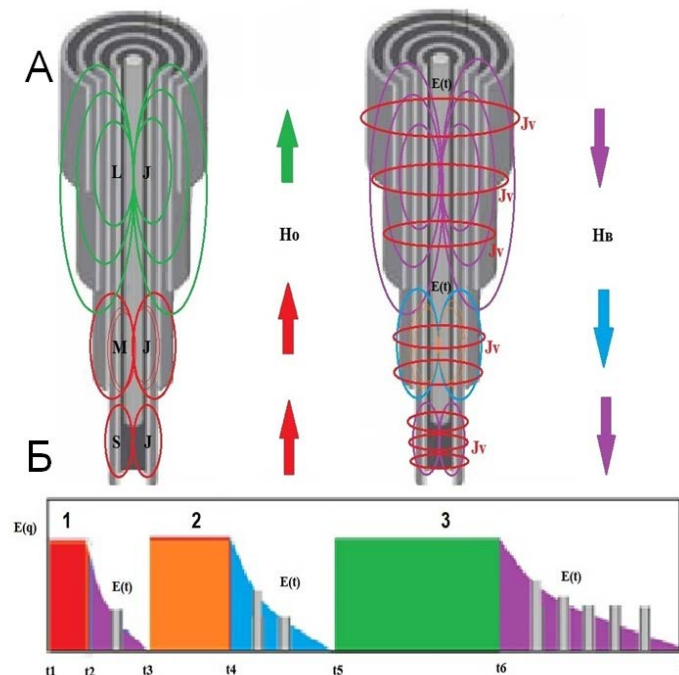


Рисунок 2.1 – Модель измерений переходных процессов в колонне для zz -компоненты поля:
 А: L, M, S - совмещенные генераторные и измерительные катушки, H_0 , $H_в$ - первичное и вторичное магнитные поля, J_v -вихревые токи
 Б: 1,2,3 - импульсы тока в соответствующих катушках, $E(t)$ - ЭДС вихревых токов, наведенных в колоннах

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.

К уменьшению времени переходных процессов может привести «питтинговая коррозия», наличие трещин в зоне перфорации, отдельные трещины протяженностью 50–100 мм, потеря металла при коррозии или износе колонны. При коррозии на значительном участке трубы изменяется значение σ и μ металла [53].

Метод переходных процессов за счет разделения по времени сигнала от разных колонн позволяет оценить техническое состояние многоколонных скважин. Для этого нужно выбрать необходимую длительность импульса тока возбуждения первичного нестационарного электромагнитного поля и время регистрации переходного процесса.

Зонды аппаратуры для электромагнитной дефектоскопии могут содержать генераторные и приемные катушки с различной ориентацией магнитного момента. Вертикальные генераторные и приемные катушки (zz зонд) используются при определении толщины, продольных трещин. Вертикальная генераторная и горизонтальная приемная катушки ($z-x$ зонд) эффективны при определении внутренних локальных дефектов различной формы; $x-x$ зонды хорошо выявляют поперечные трещины.

2.2 Численное решение прямой задачи электромагнитной толщинометрии многоколонных конструкций скважин

В цилиндрической системе координат задача о нестационарном электромагнитном поле в многоколонных скважинах сводится к решению уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} + k^2 A = 0, \quad (2.1)$$

здесь A удовлетворяет граничным условиям,

$$\mu_n \frac{\partial A_n}{\partial r} = \mu_{n+1} \frac{\partial A_{n+1}}{\partial r}, \quad (2.2)$$

$$K_n^2 A_n + \frac{\partial^2 A_n}{\partial z^2} = k_1^2 A_{n+1} + \frac{\partial^2 A_{n+1}}{\partial z^2}, \quad (2.3)$$

$k_n^2 = -i\omega\mu_n\sigma_n$ – волновое число в n -ой среде,

ω – циклическая частота, μ – магнитная проницаемость, σ – удельная электропроводность среды.

Из начальных условий в начале координат и на бесконечности запишем

$$A_1 \rightarrow e^{iK_1 R} \quad (2.4)$$

$$R \rightarrow 0$$

$$A_1 \rightarrow 0 \quad (2.5)$$

$$R \rightarrow \infty$$

Решение задачи 2.1–2.5 есть интеграл:

$$E_\varphi = E_\varphi^0 + \frac{i\omega\mu M}{4\pi} \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda C(\lambda) I_1(\lambda r) \cos \lambda z, \quad (2.6)$$

где E_φ^0 – электромагнитное поле в однородной среде,

M – магнитный момент диполя, $C(\lambda)$ – коэффициент, который вычисляется из граничных условий по рекуррентным формулам [30].

Рассмотрим задачу численного моделирования измерений зондом толщиномера в следующей постановке (рисунок 2.2). На оси симметрии кусочно-однородной среды с N коаксиально-цилиндрическими поверхностями раздела на расстоянии L друг от друга расположены генераторная и измерительная катушки. Необходимо определить ЭДС вихревых токов вторичного поля в обсадных колоннах как функцию времени в точке расположения измерительной катушки [49, 50].

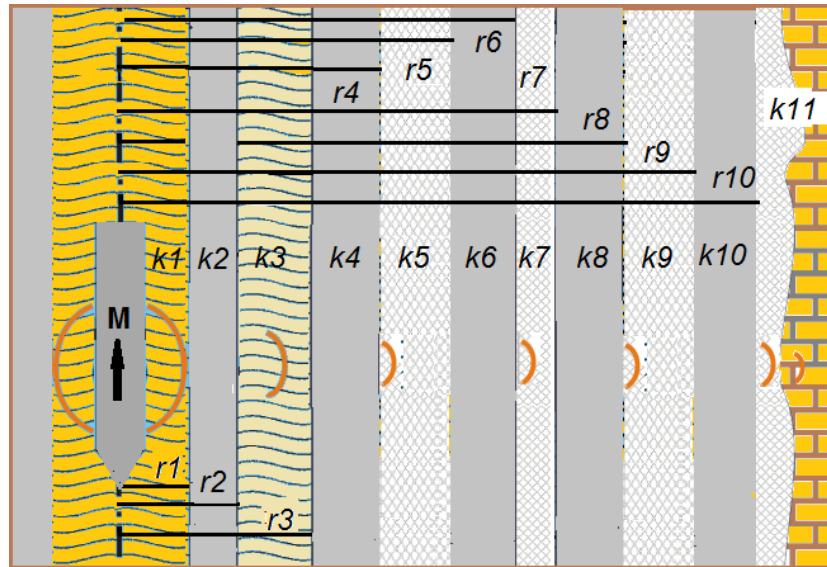


Рисунок 2.2 – Математическая модель

Воспользуемся цилиндрической системой координат R, Φ, Z с началом, совмещенным с генераторной катушкой, рассмотрим её как магнитный диполь. Координаты r_i ($i=0,1,\dots, N-1$) – цилиндрические границы, σ_i – удельная электропроводность, ϵ_i – относительная диэлектрическая проницаемость, μ_i – относительная магнитная проницаемость i -ой среды между поверхностями r_{i-1}, r_i , k_i^2 ($i=0,\dots,N$) – квадрат волнового числа.

Для расчета КС переходных процессов в многоколонных скважинах применим интеграл Фурье [16]:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{i\omega} d\omega, \quad (2.7)$$

где $h(\omega)$ – гармоническое электромагнитное поле на оси скважины, выраженное в единицах поля магнитного диполя в воздухе.

Поле магнитного диполя на оси OZ будет осесимметричным, т.е. отсутствует зависимость от угла φ .

Поле разбивается на две независимые системы [30]:

$$H_r = \frac{1}{\omega\mu} \frac{\partial E_\varphi}{\partial z}, \quad H_z = -\frac{1}{\omega\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE_\varphi), \quad (2.8)$$

где E_φ удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\varphi) + \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial z^2} + \kappa^2 E_\varphi \right] = -i\omega J, \quad (2.9)$$

где $\kappa = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$.

Применив синус-преобразование Фурье, получим

$$E_\varphi = \int_0^\infty F(\lambda r) \cos \lambda z d\lambda. \quad (2.10)$$

Функция $F(r)$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rF) \right] - (\lambda^2 - \kappa^2) F(r) = 0 \quad \text{при } r \neq 0. \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) при $0 < r < r_1$ имеет общее решение:

$$F(r) = A(\lambda) K_1(\lambda r) + B(\lambda) I_1(\lambda r). \quad (2.12)$$

Используя условия возбуждения, получим

$$F(r) = \frac{i\omega\mu\lambda}{2\pi^2} (K_1(\lambda r) + C(\lambda) I_1(\lambda r)). \quad (2.13)$$

Введём вместо функции $F(r)$ новую функцию:

$$y(r) = \frac{\mu_i}{r^2 F(r)} \frac{d}{dr} [rF(r)] \quad (2.14)$$

Подставляя (2.13) в (2.14), получим

$$C(\lambda) = C_0 = \frac{r_1 Y_1 \mu_1 K_1(\lambda_1 r_1) + \lambda K_0(\lambda_1 r_1)}{r_1 Y_1 \mu_1 I_1(\lambda r_1) - \lambda I_0(\lambda - K^2)}.$$

Для определения Y_1 получим уравнение Риккати:

$$Y^1(r) + Y^2(r) = \frac{\lambda^2 - \kappa^2}{r}. \quad (2.15)$$

Для кусочно-гладкой среды уравнение (2.15) имеет аналитическое решение.

Если обозначить $Y(r_i) = Y_i$, то получим рекуррентные формулы для определения Y_1 :

$$Y_i = \frac{\lambda_{i+1}}{r_i \mu_{i+1}} \cdot \frac{K_0(\lambda_{i+1} \cdot r_i) - C_{i+1}(\lambda) \cdot I_0(\lambda_{i+1} \cdot r_i)}{K_1(\lambda_{i+1} \cdot r_i) + C_{i+1}(\lambda) \cdot I_1(\lambda_{i+1} \cdot r_i)}, \quad (2.16)$$

$$C_i = \frac{\lambda_i K_0(\lambda_i r_i) + Y_i K_1(\lambda_i r_i) r_i \mu_i}{\lambda_i I_0(\lambda_i r_i) - Y_i K_1(\lambda_i r_i) r_i \mu_i}, \quad (2.17)$$

$$Y_{N-1} = -\frac{\lambda_N K_0(\lambda_N r_{N-1})}{\mu_N r_{N-1} K_1(\lambda_N r_{N-1})}, \quad (2.18)$$

где I_0, I_1, K_0, K_1 – модифицированные функции Бесселя от комплексного аргумента $\lambda_i = \sqrt{\lambda - k_i}$.

Из выражений (2.7) получим окончательные формулы для расчета z и r компонент магнитного поля:

$$h_z(\omega) = h_z^0(k_0, L) - \frac{L^3}{\pi} \int_0^\infty \lambda_0 C_0 I_0(\lambda_0 m) \cos \lambda L dm, \quad (2.19)$$

$$h_r(\omega) = h_r^0(k_0, L) - \frac{L^3}{\pi} \int_0^\infty \lambda_0 m C_0 I_1(\lambda m) \sin \lambda L dm, \quad (2.20)$$

$h_z^0(k_0, L), h_r^0(k_0, L), z$ и r – компоненты электромагнитного поля в однородной среде с удельной проводимостью σ_0 , $\lambda_0 = \sqrt{\lambda - k_i^2}$, C_0 – определяется из рекуррентных формул (2.16–2.18).

Для расчёта становления поля при любом числе цилиндрических поверхностей раздела необходимо провести численное интегрирование выражений (2.19–2.20).

Для вычисления воспользуемся методом линейной фильтрации. Функции Бесселя малых и больших значений аргумента вычисляются по различным формулам. В интервале $|\lambda_i r_j|$ от 0 до 6 расчет осуществляется на основе степенных рядов, обеспечивающих точность 10^{-7} до $|\lambda_i r_j| \leq 6$, а при $|\lambda_i r_j| > 6$ использовалось разложение по полиномам Чебышева.

Чтобы избежать потери точности при большом числе колонн, целесообразно преобразовать формулы (2.16–2.18), тогда

$$Y_{i-1} = -\frac{m_i}{r_{i-1} \mu_i} \frac{K_0(m_i r_{i-1}) e^{m_i r_{i-1}} - S_i I_0(m_i r_{i-1}) e^{-m_i r_{i-1}}}{K_1(m_i r_{i-1}) e^{m_i r_{i-1}} + S_i I_1(m_i r_{i-1}) e^{-m_i r_{i-1}}},$$

где $S_i = C_i e^{-2m_i t_{i-1}}$.

При расчете Y_{i-1} вычисляются функции

$I_0(x)e^{-x}$, $I_1(x)e^{-x}$, $K_0(x)e^x$, $K_1(x)e^{-x}$ по полиномам Чебышева.

Определённую сложность представляет вычисление обратного преобразования Фурье, так как для сравнения модельных расчётов с экспериментом требуется обеспечить большой динамический диапазон – 150 Дб. Отличительной чертой рассматриваемых сигналов является очень резкий выброс и последующий спад на малых временах. Обратное преобразование Фурье в любом случае выполняется по ограниченному диапазону частот $[-\omega_{\max}, +\omega_{\max}]$, что может привести к искажению сигнала на средних и больших временах за счёт появления «боковых лепестков» начального выброса. Чтобы избежать этого, необходимо использовать при выполнении преобразования Фурье оконную функцию $w(\omega)$:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} w(\omega) h(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{i\omega} d\omega. \quad (2.21)$$

В программном обеспечении используются оконные функции Кайзера, задающиеся формулой:

$$w(\omega) = \frac{\left| I_0 \left(\beta \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{\max}^2}} \right) \right|}{|I_0(\beta)|}, \quad (2.22)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя 1-го рода. Изменяя параметр β , можно регулировать степень подавления боковых лепестков. Вид оконной функции Кайзера и её спектра при нескольких значениях параметра представлен на рисунке 2.3.

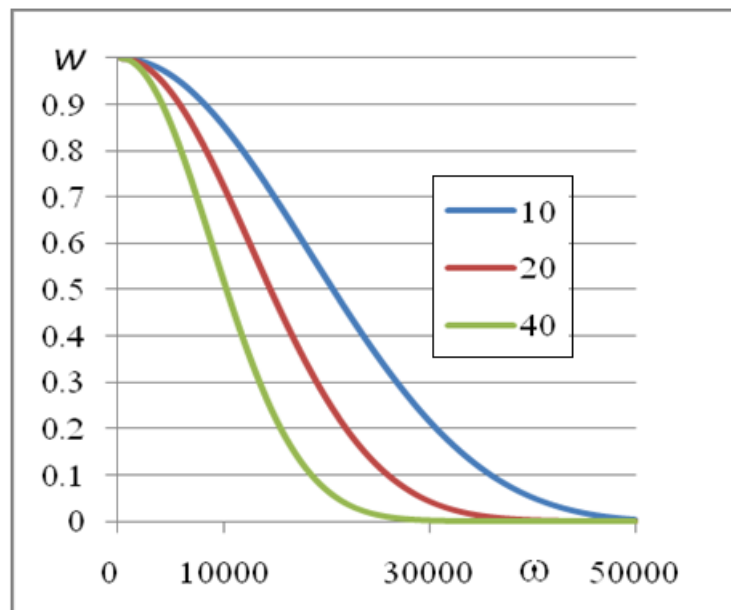


Рисунок 2.3 – Функция Кайзера. Шифр кривых – β

2.3 Оценка влияния геометрии и электромагнитных параметров колонн на кривые спада переходного процесса

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

Чувствительность метода как толщиномера определяется по формуле

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

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

Погрешность определения толщины можно оценить как обратную величину чувствительности $\delta T = (1/\eta) \cdot \varepsilon$, где ε – относительная погрешность измерений.

Математическое моделирование кривых спада (КС) переходных процессов проведено для одно-, пятиколонных скважин. Диаметры колонн (D) изменяются в диапазоне 73–508 мм, магнитная проницаемость (μ) – 10–120 отн.ед., электропроводность металла (σ) – $3 \cdot 10^7$ мСм/м, толщина колонн от 7 до 18 мм [46].

2.3.1 Одноколонная модель (обсадные колонны большого диаметра)

Математическую модель одноколонной скважины можно описать четырьмя параметрами: удельная электропроводность (σ) и магнитная проницаемость (μ) – электромагнитные, внешний диаметр (D) и толщина стенки трубы (T) – геометрические.

Расчёты кривых спада проведены для труб диаметром 245, 305, 508 мм, толщина стенки изменялась от 8 до 18 мм во временном интервале 0–100 мс. На рисунках 2.4–2.6 приведены диаграммы кривых спада переходных процессов как функции времени. Шифр рисунка – магнитная проницаемость стали (μ), шифр кривых – толщина стенки колонны, ось ординат имеет размерность $A=B/A$ (вольт/ампер), удельная электропроводность металла $\sigma=3 \cdot 10^7$ мСм/м.

Семейства кривых спада можно разделить на две временные области. На ранних стадиях (в интервале 0– t_r) постоянная скорости спада и амплитуда ЭДС переходного процесса не зависит от толщины стенки колонны. Причем t_r зависит от диаметра трубы и магнитной проницаемости стали. Во второй области при $t > t_r$ на скорость спада и амплитуду КС влияет изменение толщины стенки колонны.

В таблице 2.1 приведены значения t_r , при которых вихревые токи затухают во всем теле трубы.

Таблица 2.1 Время прохождения поля через стенку трубы

μ , отн.ед.	D , мм				
	245	305	345	508	600
30	10	12,5	15	20	22
40	12	17,5	20	23	23
60	15	20	23	29	24
80	20	22	25	30	30
100	22	25	28	31	32
150	24	28	30	32	33

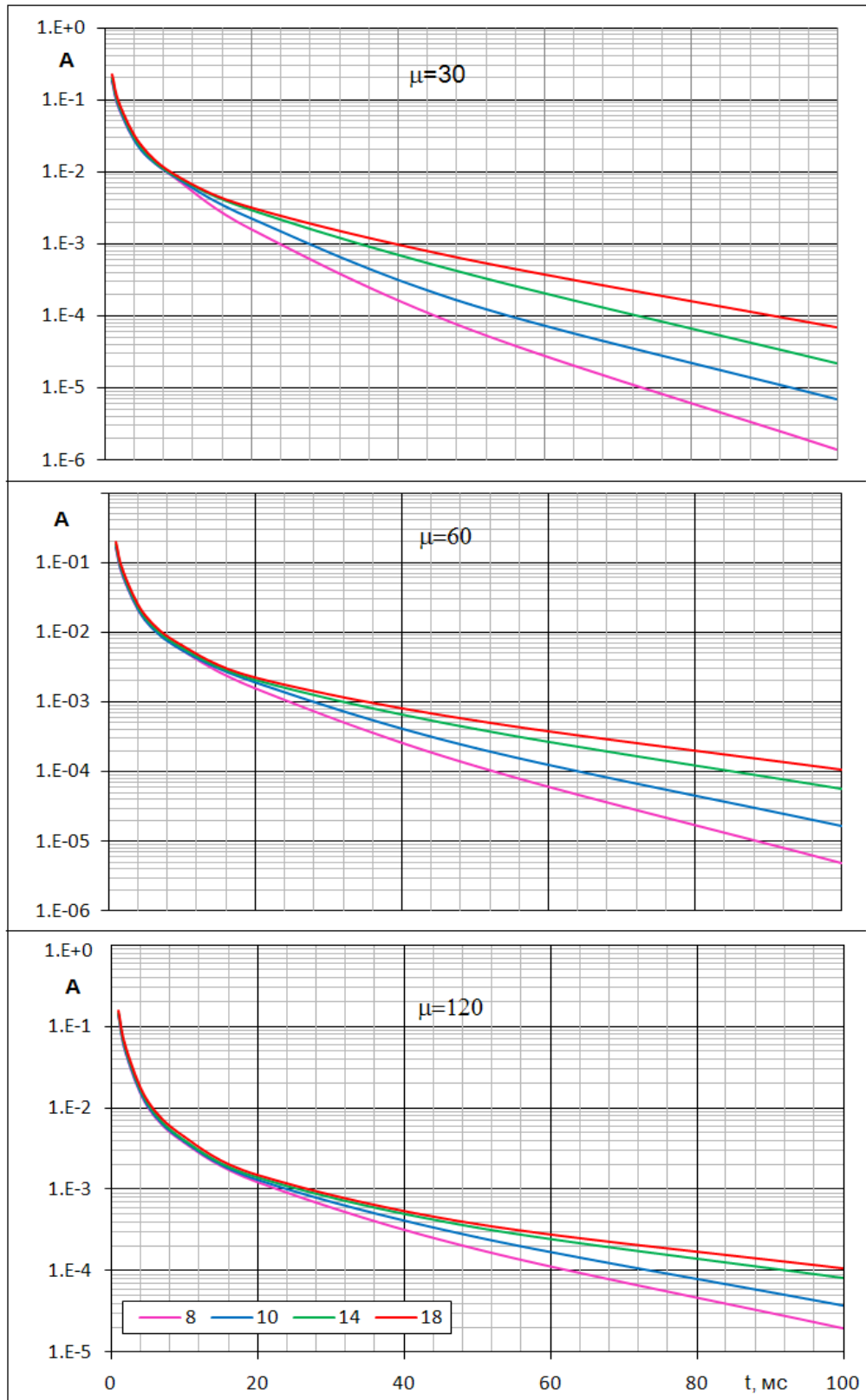


Рисунок 2.4 – КС в трубе диаметром 245 мм, $\mu=30$, $\mu=60$ и $\mu=120$ отн.ед.
Шифр кривых – толщина, мм.

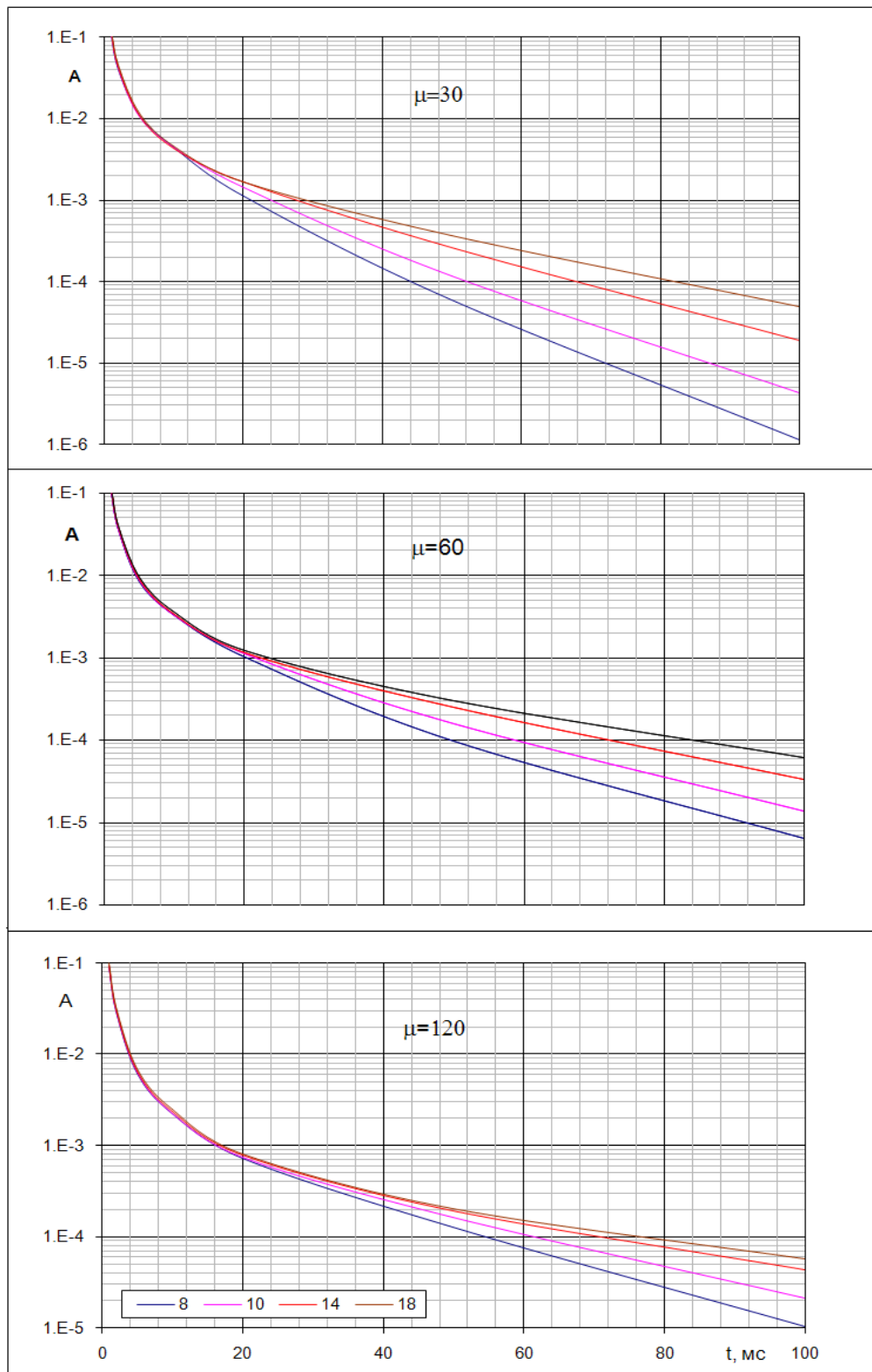


Рисунок 2.5 – КС в трубе $D=305$ мм, $\mu=30$, $\mu=60$ и $\mu=120$ отн.ед.
Шифр кривых – толщина, мм

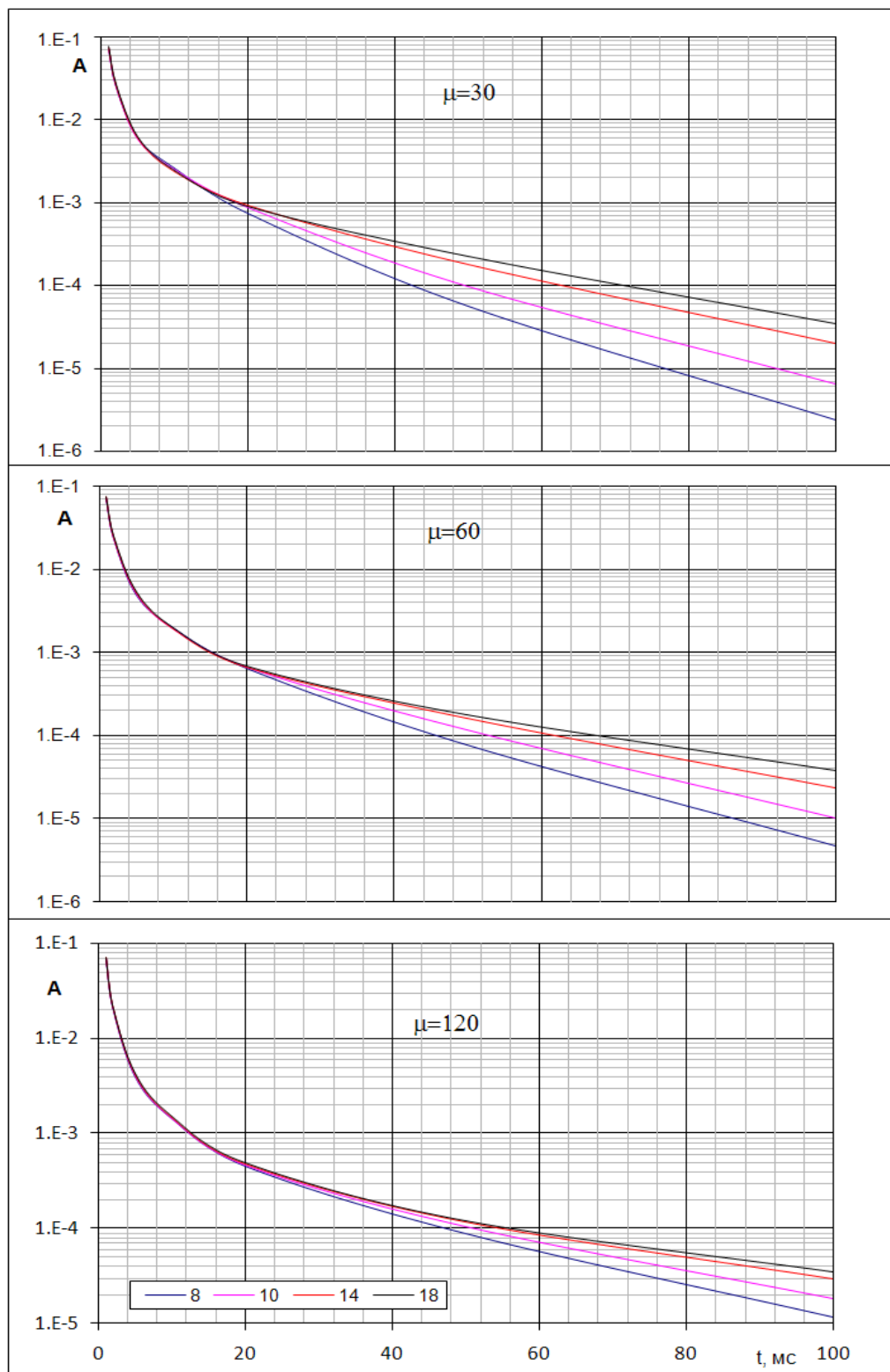


Рисунок 2.6 – КС в трубе $D=508$ мм, $\mu=30$, $\mu=60$ и $\mu=120$ отн.ед.
Шифр кривых – толщина, мм

На рисунке 2.7 приведены кривые спада в зависимости от диаметра трубы при μ металла 60 отн.ед. и толщине стенки 10 мм. Амплитуда кривых спада зависит от диаметра трубы на ранних временах переходного процесса, с увеличением диаметра амплитуда падает.

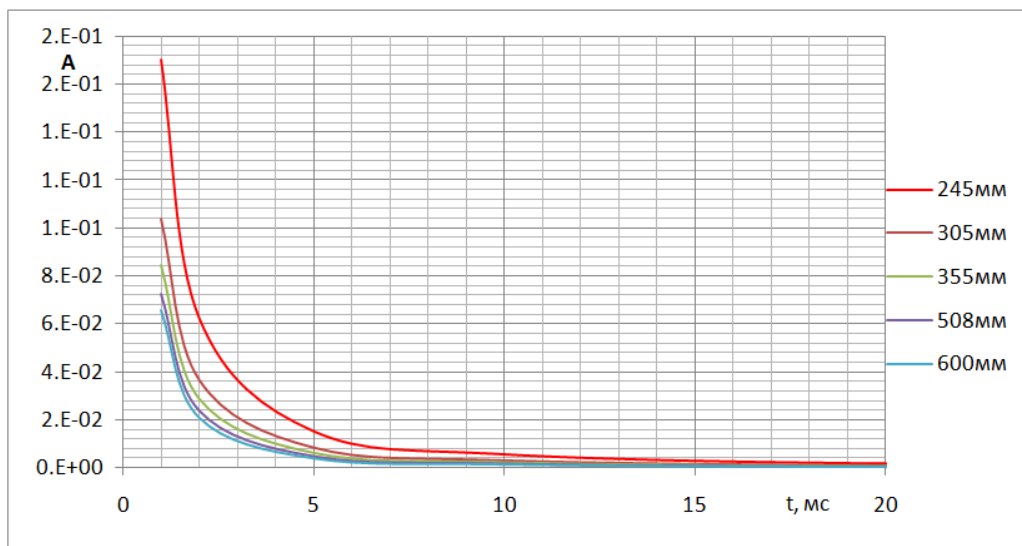


Рисунок 2.7– Зависимость кривых спада от диаметра колонны.

Шифр кривых – диаметр, мм

Результаты моделирования при постоянных значениях σ , толщины трубы, диаметра и переменных значений μ приведены на рисунке 2.8 для труб диаметром 245 и 600 мм, при толщине стенки 10 мм. На ранних стадиях переходного процесса с увеличением μ амплитуда КС падает, а на поздних – увеличивается (переходный процесс затягивается). В точке $t_{и}$ наблюдается инверсия кривых для различных μ . Для трубы диаметром $D=245$ мм точка инверсии при $t_{и}=33$ мс, а для трубы диаметром $D=600$ мм – при $t_{и}=80$ мс. Наличие точки инверсии позволяет достаточно надёжно отличать аномалии от изменения магнитной проницаемости металла труб от аномалий, связанных с потерей металла. При потере металла не наблюдается инверсия кривых в приведённых временных интервалах.

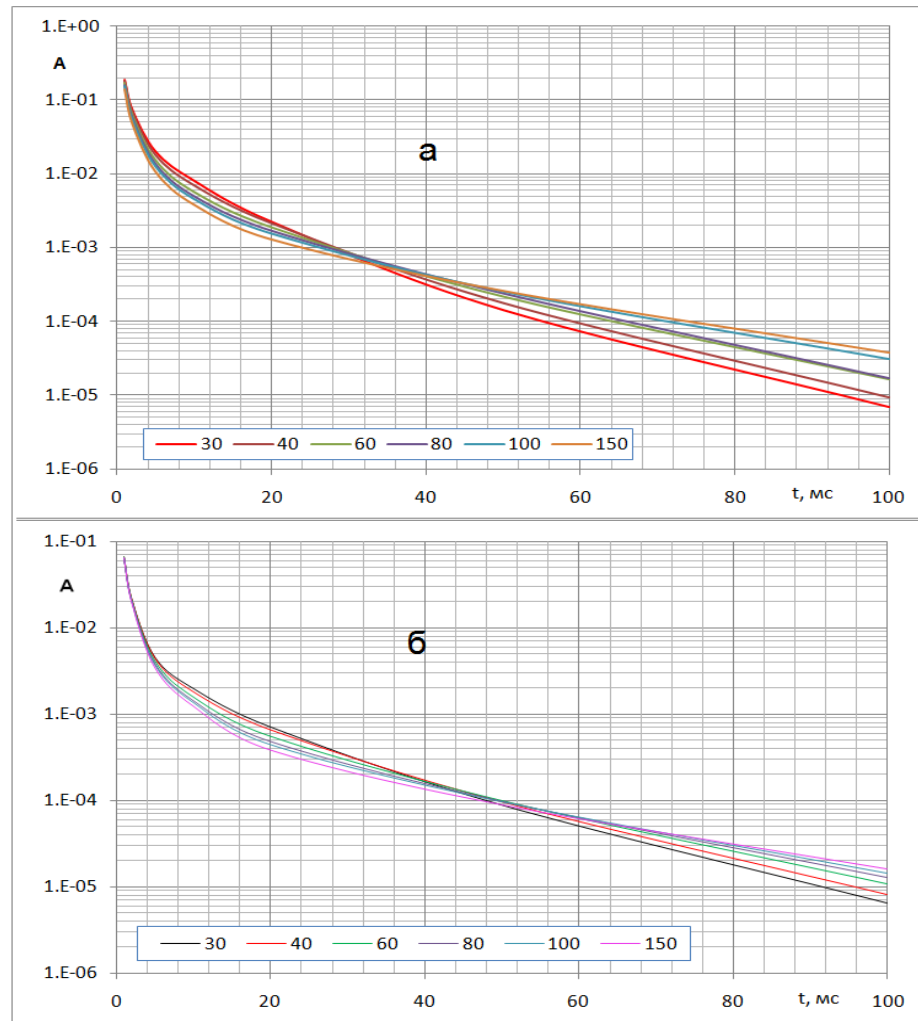


Рисунок 2.8 – Зависимость кривых спада от μ : а – $D=245$ мм, б – $D=600$ мм.
Шифр кривых – μ , отн.ед.

Чувствительность метода (η) к изменению толщины стенки при изменении магнитной проницаемости и геометрии металла приведена на рисунках 2.9–2.10.

Чем толще стенка трубы, тем меньше η , например, для трубы диаметром 245 мм $\eta=8$ для $T=9$ мм и $\eta=2$ для $T=16$ мм (рисунок 2.9). Чувствительность η падает при увеличении диаметра трубы и μ стали (рисунок 2.10).

Таким образом, чем больше диаметр труб, толщина трубы, магнитная проницаемость, тем больше должна быть длительность импульса тока.

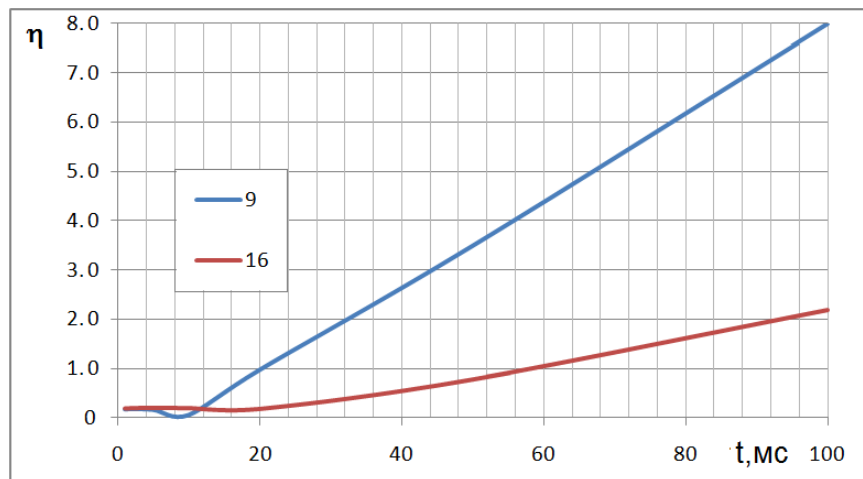


Рисунок 2.9 – Зависимость η от толщины колонны, $D=245$ мм.
Шифр кривых – толщина, мм

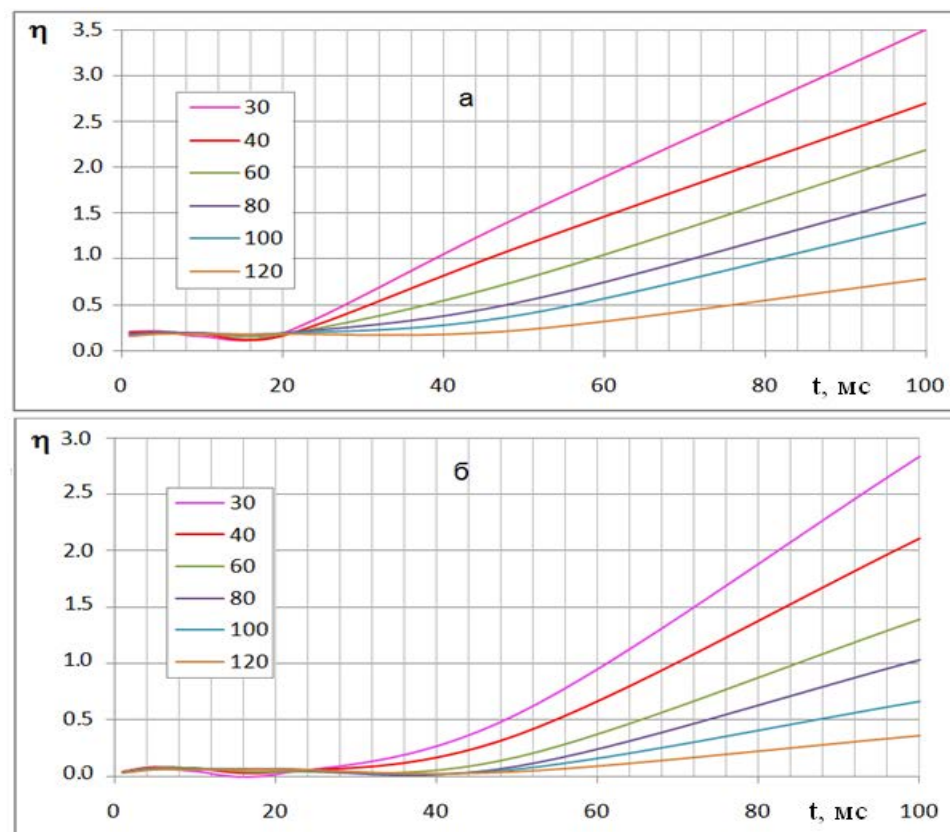


Рисунок 2.10 – Зависимость чувствительности η от μ колонны: а – $D=245$ мм,
б – $D=600$ мм. Шифр кривых – μ , отн. ед.

2.3.2 Двухколонная модель

Пример регистрации переходных процессов рассмотрим на следующих моделях: первая колонна диаметром 114 мм имеет толщину 7 и 9 мм, $\mu=30$ отн.ед.; вторая колонна двух диаметров – 168 мм и 178 мм, магнитная проницаемость металла изменяется в интервале 30–120 отн.ед., а толщина имеет величины 8, 10, 14 и 18 мм.

На рисунке 2.11 приведены кривые спада для модели 114+178 мм при толщине стенки первой колонны 7 мм. В интервале 0–20 мс вихревые токи распространяются в первой колонне (амплитуда и скорость спада переходного процесса не зависят от толщины и электромагнитных характеристик второй колонны). Для модели 114+178 мм при толщине стенки первой колонны 9 мм (рисунок 2.12) переходный процесс в первой колонне затягивается до 30 мс. Изменение магнитных свойств второй колонны не влияет на характеристику ПП в первой колонне.

При диаметре второй колонны 168 мм время переходного процесса в первой колонне с толщиной стенки 7 мм – 10 мс, а с толщиной 9 мм – 15 мс (рисунки 2.13–2.14). При диаметре 2-й колонны 168 мм вихревые токи начинают распространяться на более ранних временах, чем в колонне диаметром 178 мм.

Рассмотрим результаты моделирования КС для модели с постоянными значениями толщин первой и второй колонн, постоянной μ первой колонны и переменной μ второй колонны. На рисунке 2.15 а приведены КС для модели 114+168 мм, толщина стенки второй трубы 10 мм, μ второй колонны изменяется от 30 до 120, толщина первой колонны 7 мм. В интервале 0–20 мс амплитуда и скорость спада не зависят от μ второй колонны, в интервале 20–70 мс амплитуда КС падает с увеличением μ второй колонны, при $t>70$ мс происходит инверсия кривых.

Для модели 114+168 при толщине стенки первой колонны 9 мм КС не зависит от μ второй колонны в интервале 0–30 мс, инверсия кривых при $t > 85$ мс (рисунок 2.15б).

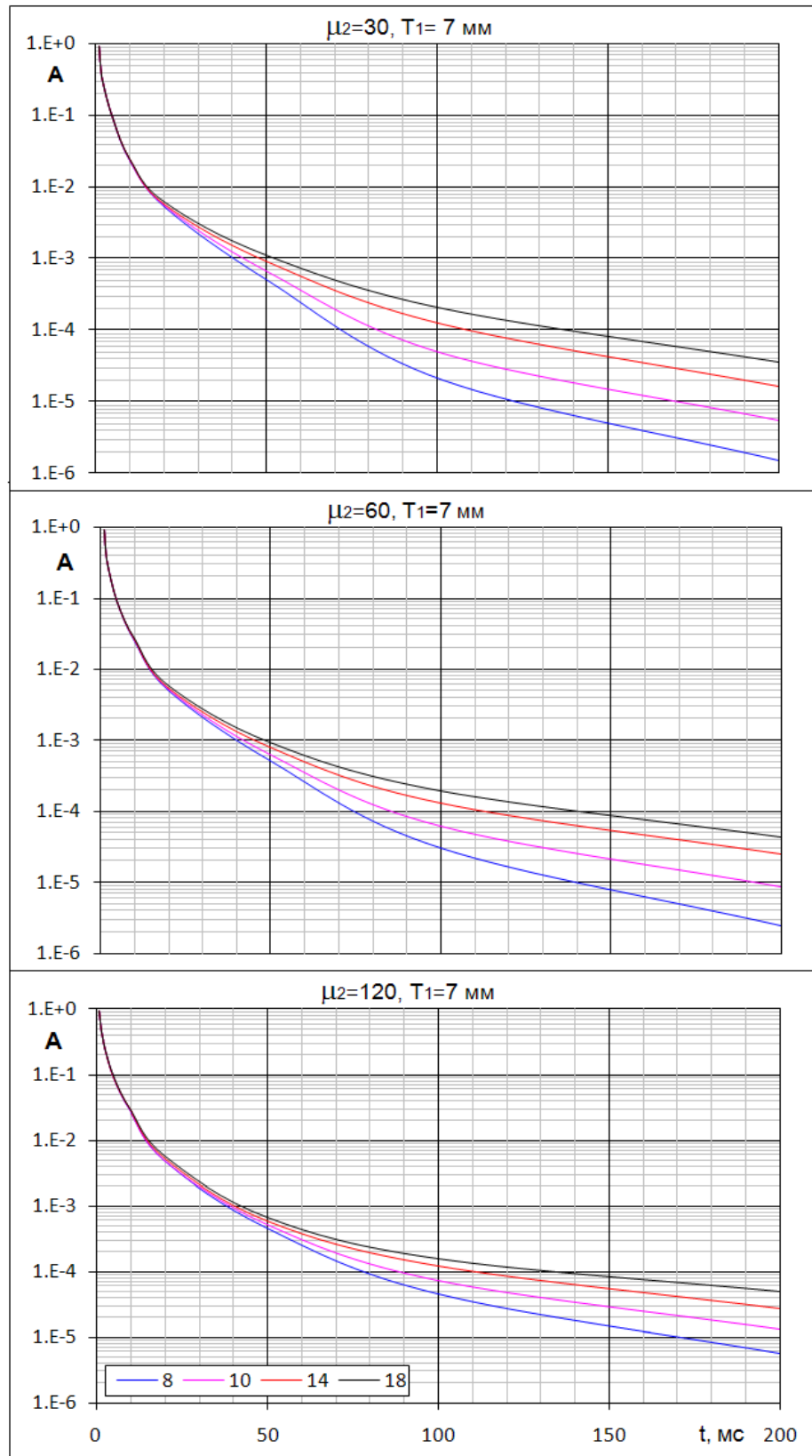


Рисунок 2.11 – КС для модели 114+178 мм, $\mu_1=30$ $T_1=7$ мм.
Шифр кривых – толщина второй колонны

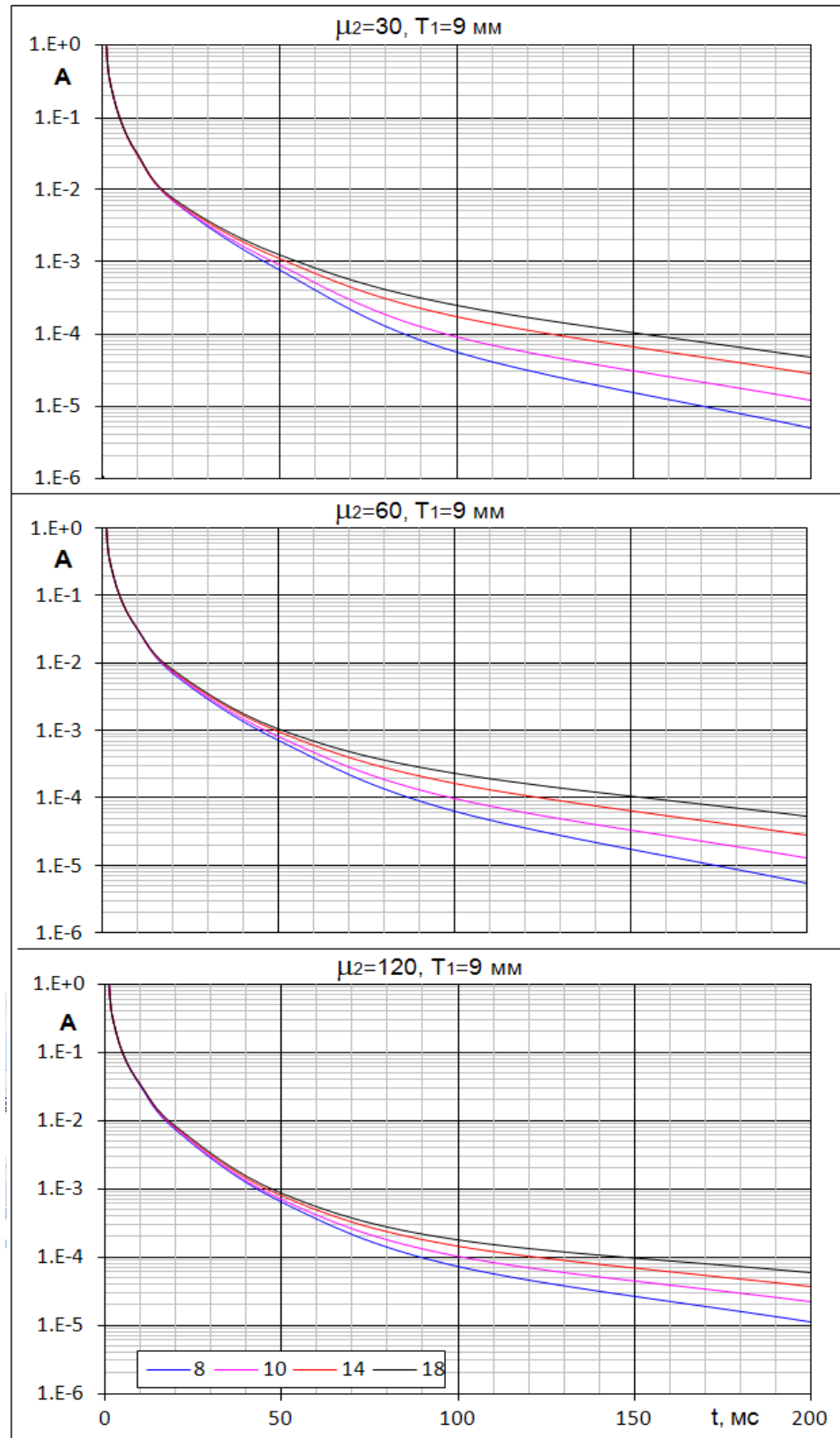


Рисунок 2.12 – КС для модели 114+178 мм, $\mu_1=30$, $T_1=9$ мм.
Шифр кривых – толщина второй колонны

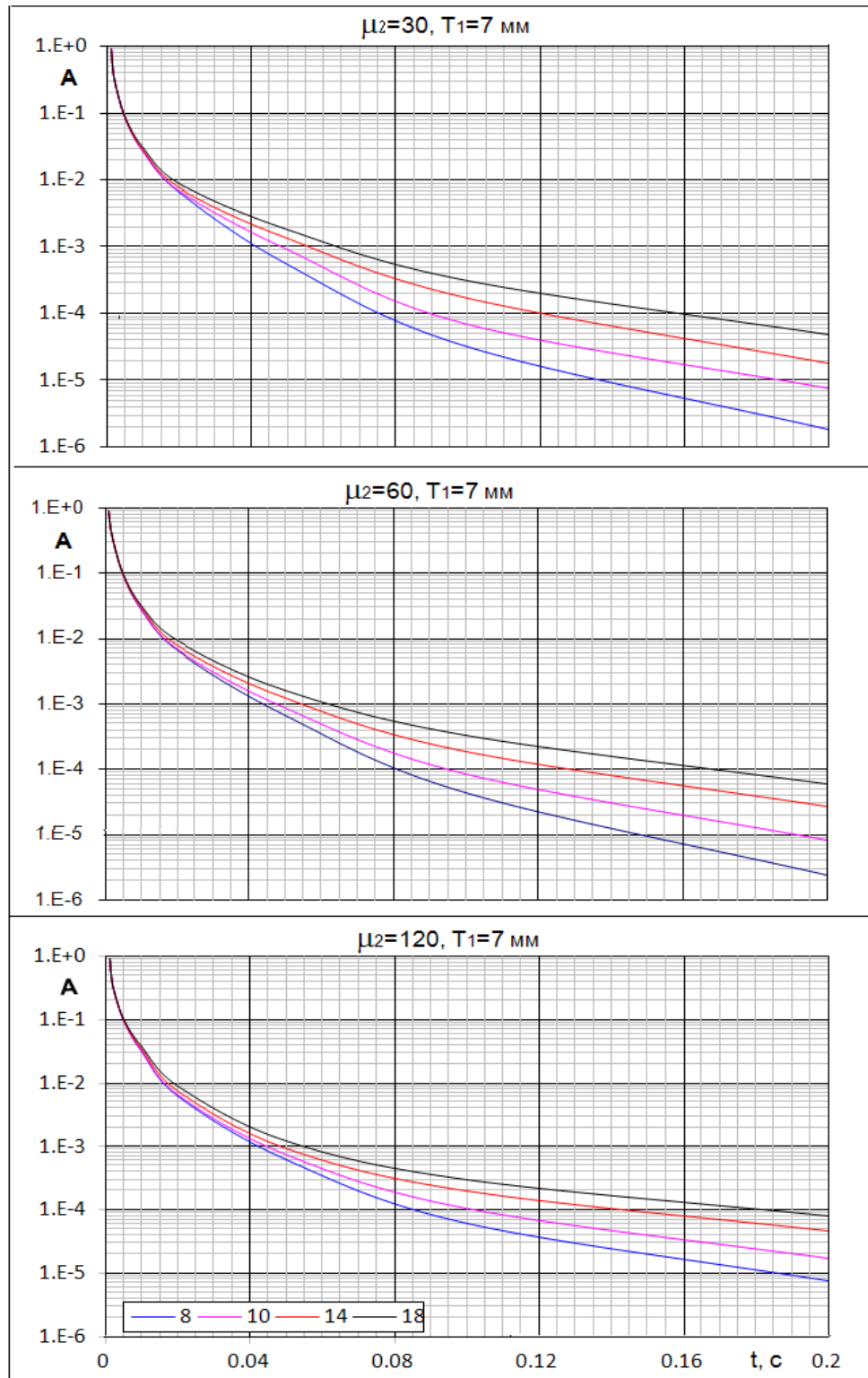


Рисунок 2.13 – КС для модели 114+168 мм, $\mu_1=30$, $T_1=7$ мм.
Шифр кривых – толщина второй колонны

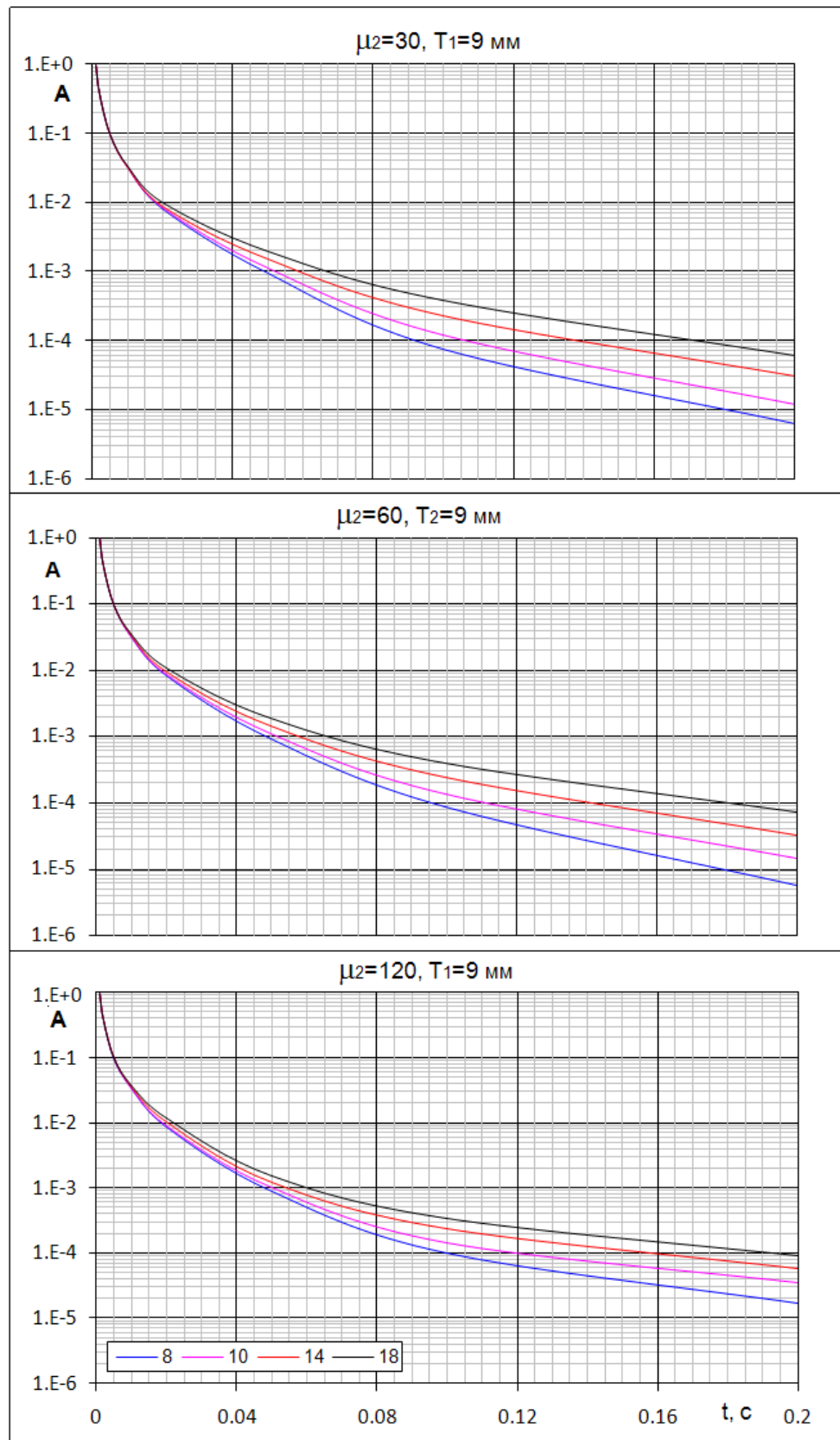


Рисунок 2.14 – КС для модели 114+168 мм, $\mu_1=30, T_1=9$ мм.
Шифр кривых – толщина второй колонны

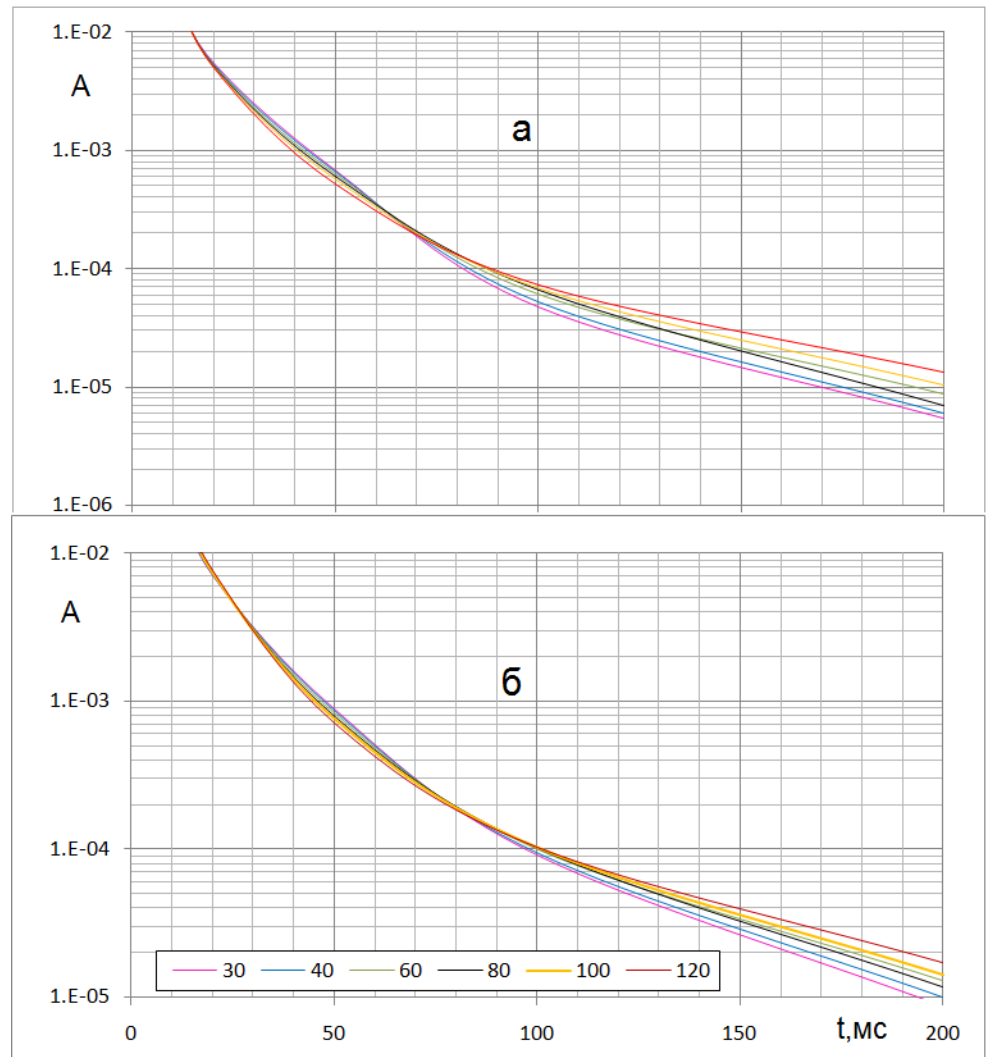


Рисунок 2.15 – КС в зависимости от μ металла для модели 114+168:
 а – толщина первой колонны 7 мм, б – толщина первой колонны 9 мм.
 Шифр кривых – μ , отн. ед.

2.3.3 Трехколонная модель

Для анализа результатов измерений распространения вихревых токов в трехколонных скважинах осуществим моделирование кривых спада переходных процессов для двух типов моделей. Для модели № 1 постоянными величинами задаются диаметры колонн (D), толщины первой и второй колонн (T), магнитная проницаемость металла третьей колонны (μ_3). Переменными величинами являются толщина третьей колонны, магнитная проницаемость металла ($\mu_{1,2}$) первой и второй колонн (таблица 2.2).

Начало времени регистрации переходных процессов в третьей колонне определяется диаметром колонн, суммарной толщиной внутренних колонн, удельной электропроводимостью металла первых двух колонн.

Таблица 2.2. Модель №1

№ трубы	D, мм	T, мм	μ
1	114	9	30–150
2	178	12	30–150
3	305	8–18	30

На рисунке 2.16 приведены примеры вычисления кривых спада в интервале времен 100–500 мс в зависимости от магнитной проницаемости металла двух колонн и толщины стенки третьей трубы, толщины первой и второй труб приведены в таблице.

Время регистрации ПП в третьей колонне при $\mu_{1,2}=30$ начинается с $t=100$ мс, при $\mu_{1,2}=60$ – с $t=170$ мс, а при $\mu_{1,2}=120$ – с $t=350$ мс. Чувствительность кривых спада к изменению толщины стенки третьей колонны зависит от магнитной проницаемости первой и второй колонн, с увеличением магнитной проницаемости от $\mu_{1,2}=30$ до $\mu_{1,2}=120$ она уменьшается на порядок при $t=500$ мс. Для обеспечения регистрации потери металла магнитных труб ($\mu>100$) необходимо увеличивать длительность импульса тока возбуждения и времени регистрации ПП до 1 000–2 000 мс.

В таблице 2.3 приведены параметры модели, у которой при постоянных параметрах первой и второй колонн меняются толщина и магнитная проницаемость третьей колонны.

Таблица 2.3. Модель №2

№ трубы	D, мм	T, мм	μ , отн.ед.
1	114	9	30
2	178	8	30
3	305	8–18	30–150

На рисунке 2.17 приведены кривые спада для модели № 2.

Переходные процессы в третьей колонне регистрируются на временах больше 100 мс, чувствительность к изменению толщины третьей колонны на времени 500 мс – $\eta=2,85$ для $\mu_3=30$, $\eta=2,7$ для $\mu_3=60$, $\eta=2,5$ для $\mu_3=120$. В данном диапазоне времени магнитная проницаемость третьей колонны практически не влияет на ПП.

На рисунке 2.18 приведены результаты моделирования для модели с постоянными значениями T_1 , T_2 , магнитной проницаемостью $\mu_3=10$, $T_3=10$ мм, переменными μ первой и второй колонн (модель №1). На ранней стадии ПП с увеличением $\mu_{1,2}$ амплитуда падает, а на поздней стадии ПП амплитуда растет. Точки инверсии зависят от $\mu_{1,2}$ и лежат в интервале времени 100–350 мс.

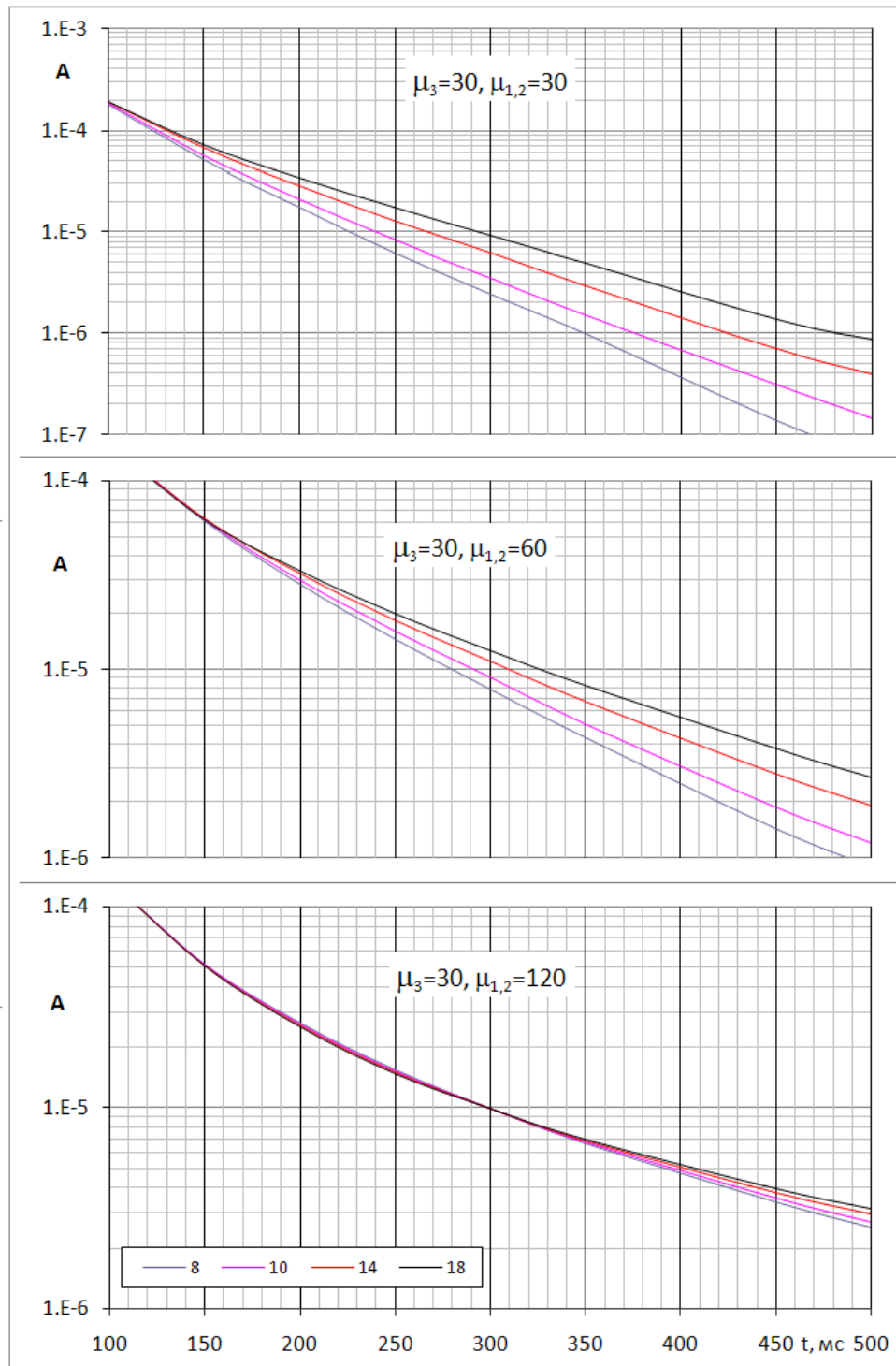


Рисунок 2.16 – КС для модели №1, $\mu_3=30$ отн.ед.
Шифр кривых – толщина третьей колонны, мм

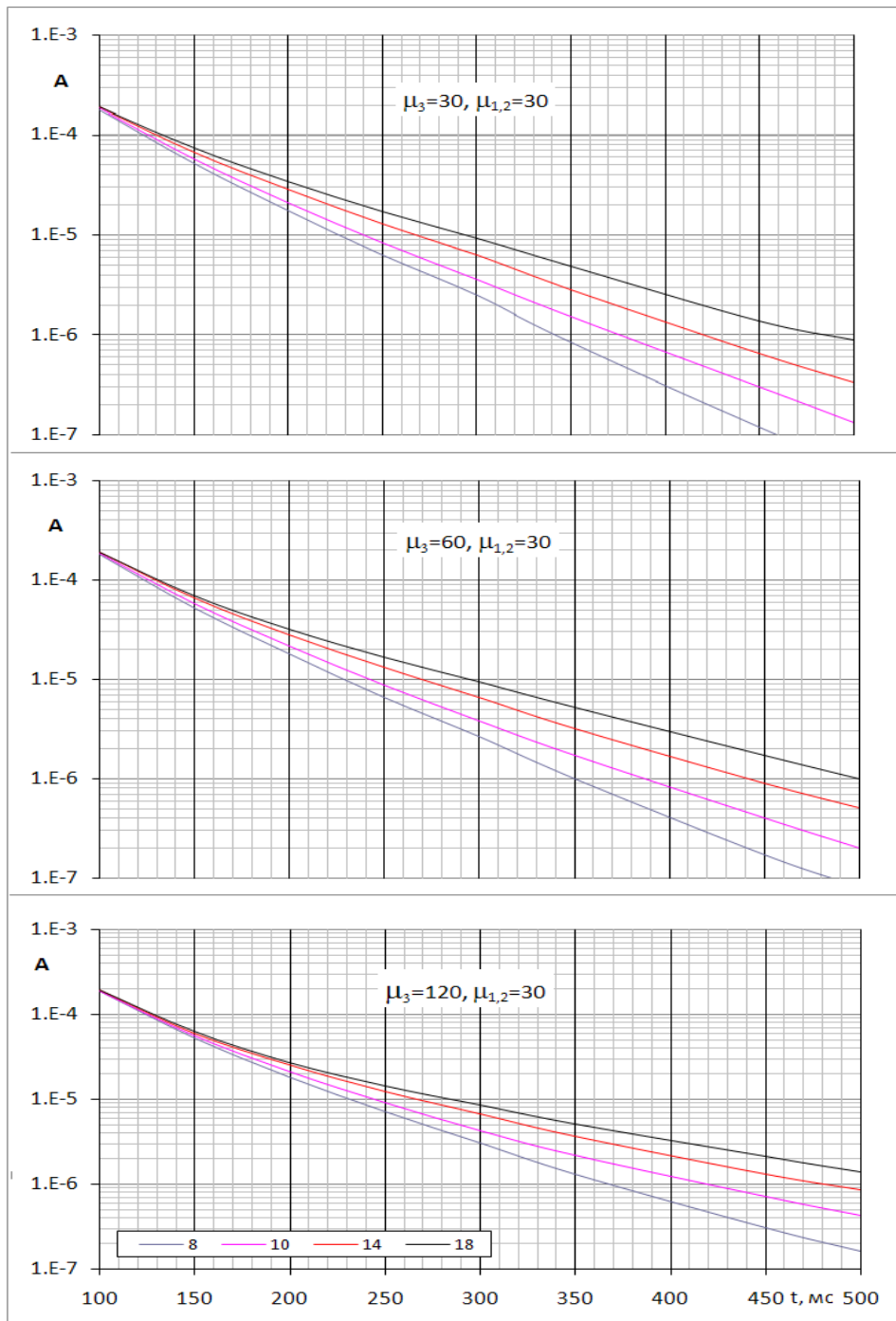


Рисунок 2.17 – КС для модели №2, $\mu_{1,2}=30$ отн.ед.
Шифр кривых – толщина третьей колонны, мм

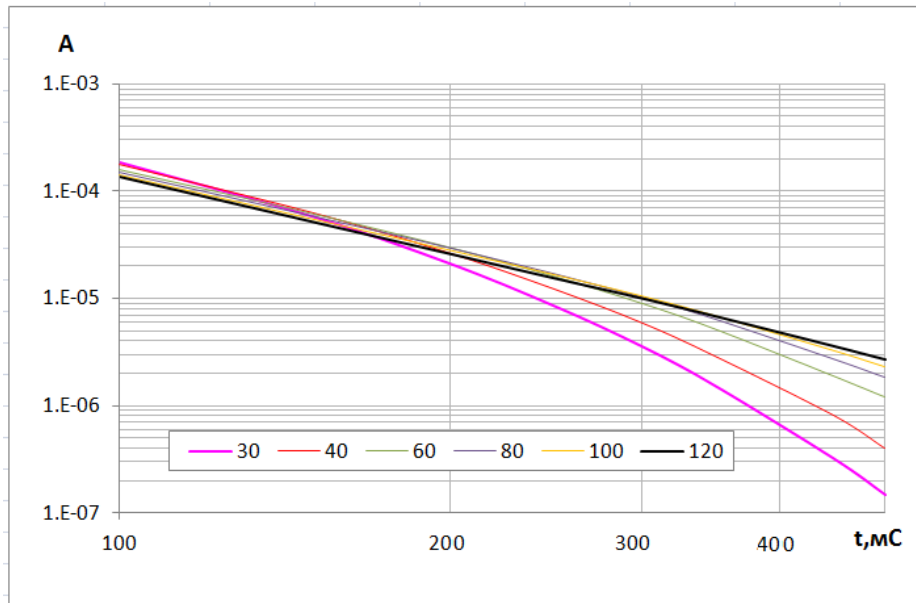


Рисунок 2.18 – КС для модели №1, $\mu_3=10$, $T_3=10$ мм.
Шифр кривых – $\mu_{1,2}$

На рисунке 2.19 приведены КС для модели № 2 при постоянном значении $\mu_{1,2}=30$ и $T_2=10$ мм, изменяется μ_3 . Влияние магнитной проницаемости третьей колонны на скорость спада ПП начинается с 240 мс, при изменении толщины стенки колонны с 150 мс. Таким образом, можно различать аномалии при потере металла от аномалий изменения толщины на каротажных кривых спада.

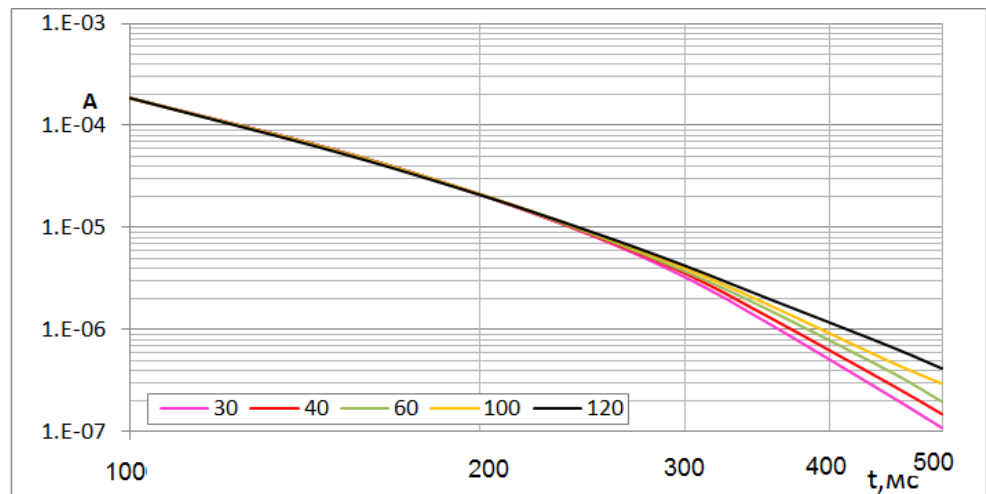


Рисунок 2.19 – КС для модели №2, $T_3=10$ мм, $\mu_{1,2}=30$.
Шифр кривых – μ_3

2.3.4 Четырехколонная модель

Для четырехколонных моделей рассмотрим результаты моделирования для слабомагнитных ($\mu=10$ отн.ед.) и магнитных ($\mu=60$ отн.ед.) труб (таблица 2.4). Для случая слабомагнитных первых трех труб (модель 1) ПП в четвертой колонне регистрируется на временах больше 150 мс (рисунок 2.20).

Таблица 2.4. Параметры моделей четырех колонн

№ трубы	Модель 1			Модель 2		
	D, мм	T, мм	μ	D, мм	T, мм	μ
1	114	9	10	114	9	60
2	178	14	10	178	14	60
3	305	16	10	305	16	60
4	508	8–18	30–150	508	8–18	30–150

Для магнитных труб КС рассчитывались при длительности импульса тока возбуждения и регистрации переходных процессов 1000 мс. На рисунке 2.21 приведены КС для $\mu_{1-3}=60$ при изменении толщины четвертой колонны. Влияние на сигнал наличия четвертой трубы начинается при времени регистрации больше 450 мс.

Отметим, что изменение магнитной проницаемости в четыре раза практически не влияет на длительность ПП в интервале времени 300–400 мс. Максимальное отклонение амплитуды не более 8 % при $t=1000$ мс.

В таблице 2.5 приведены нормированные значения кривых спада при толщине четвертой колонны 10 мм в зависимости от μ_4 .

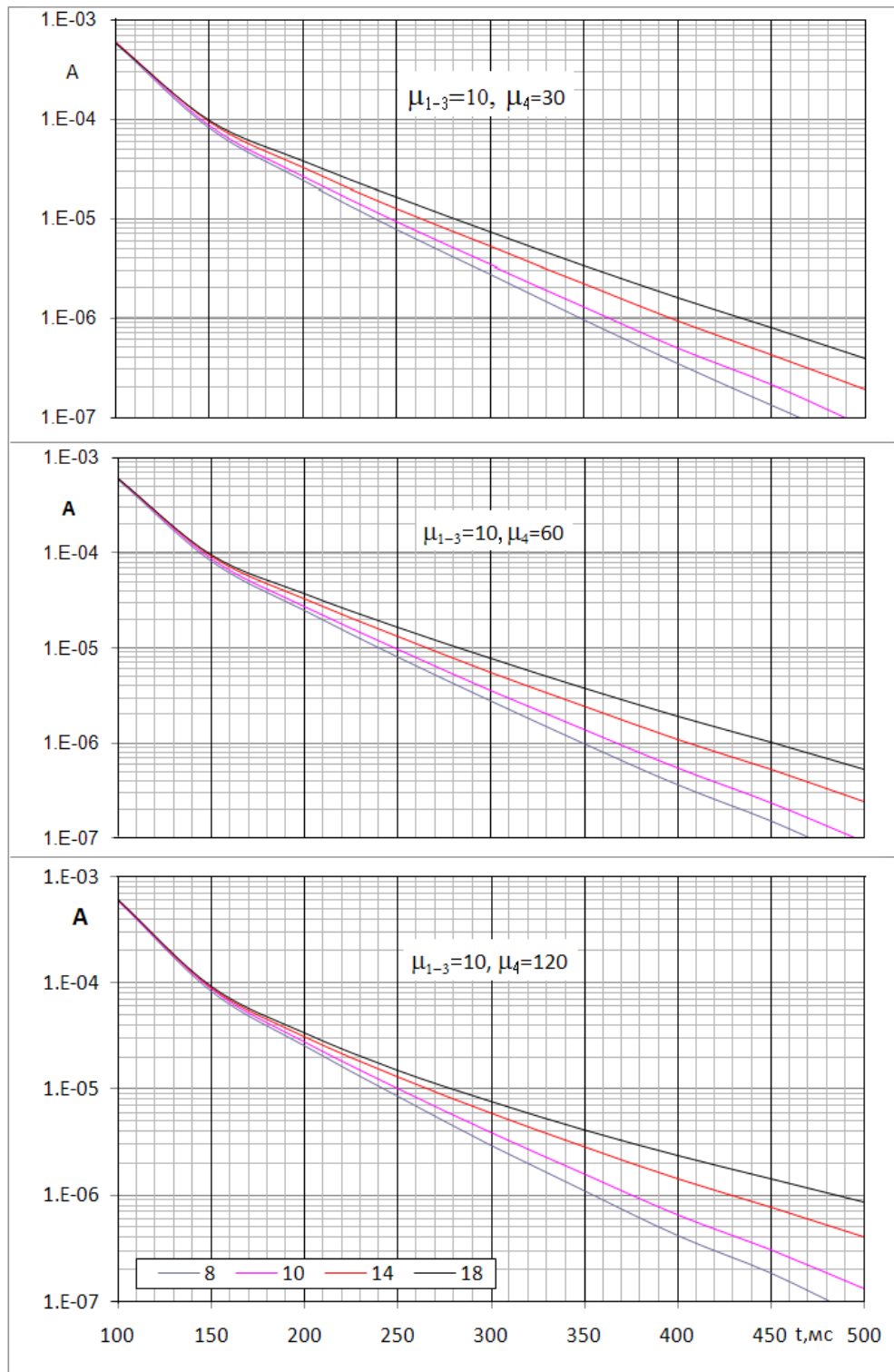


Рисунок 2.20 – КС для модели №1, $\mu_{1-3}=10$.
Шифр кривых – T_4

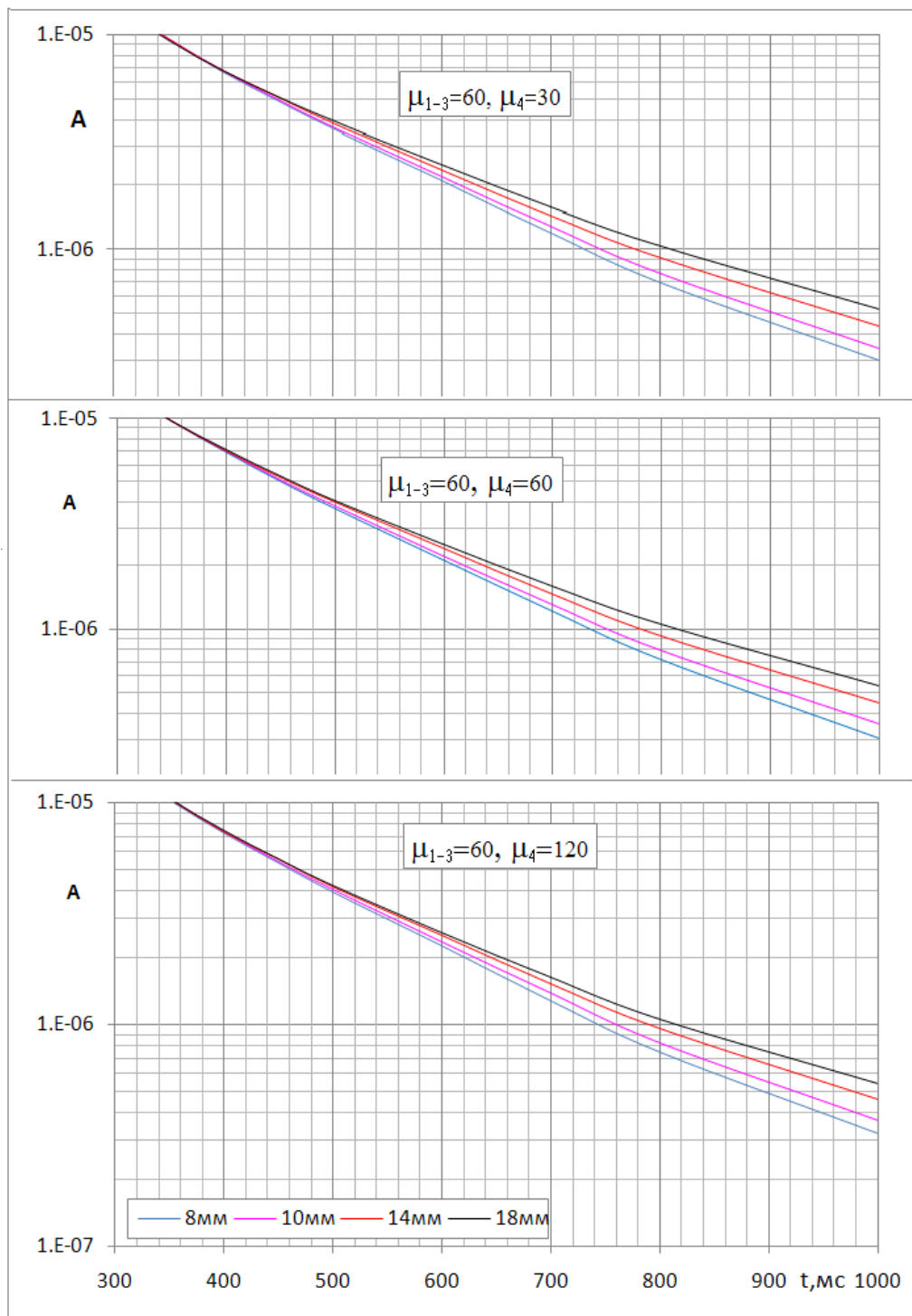


Рисунок 2.21 – КС для модели №2, $\mu_{1-3}=60, \mu_4=30, 60, 120$.
Шифр кривых – T_4

Таблица 2.5. 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

На рисунке 2.22 приведены зависимости η от времени регистрации для различной толщины трубы (модели 2). С увеличением толщины стенки третьей трубы η падает.

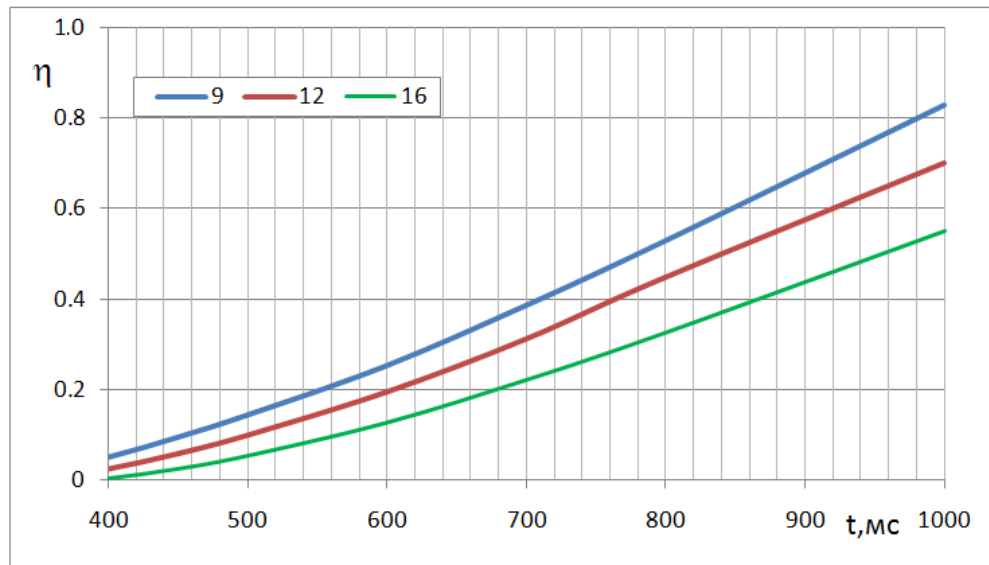


Рисунок 2.22 – Чувствительность к изменению толщины стенки четвертой трубы $D=508$ мм.
Шифр кривых – T_4

2.3.5 Пятиколонная модель

В таблице 2.6 приведены геометрические размеры труб.

Таблица 2.6. Модели пяти колонн

№ трубы	Модель 1		Модель 2	
	D, мм	T, мм	D, мм	T, мм
1	114	7	114	7
2	168	10	168	10
3	245	10	245	10
4	305	7	305	7
5	600	8–18	508	8–18

На рисунках 2.23–2.25 приведены кривые спада для модели пяти колонн с диаметром пятой трубы 508 мм (модель 2), а на рисунках 2.26–2.28 диаметр пятой трубы 600 мм (модель 1), $\mu_{1-4}=10$. Пятая труба 508 мм регистрируется на интервале от 150 мс до 400–500 мс. Для трубы диаметром 600 мм интервал регистрации 180 мс–500 мс. Отношение сигнала при толщинах труб (T) 8 мм и 18 мм составляет 10 Db для $\mu=30$ при времени 500 мс, для одной колонны 10 Db при 100 мс.

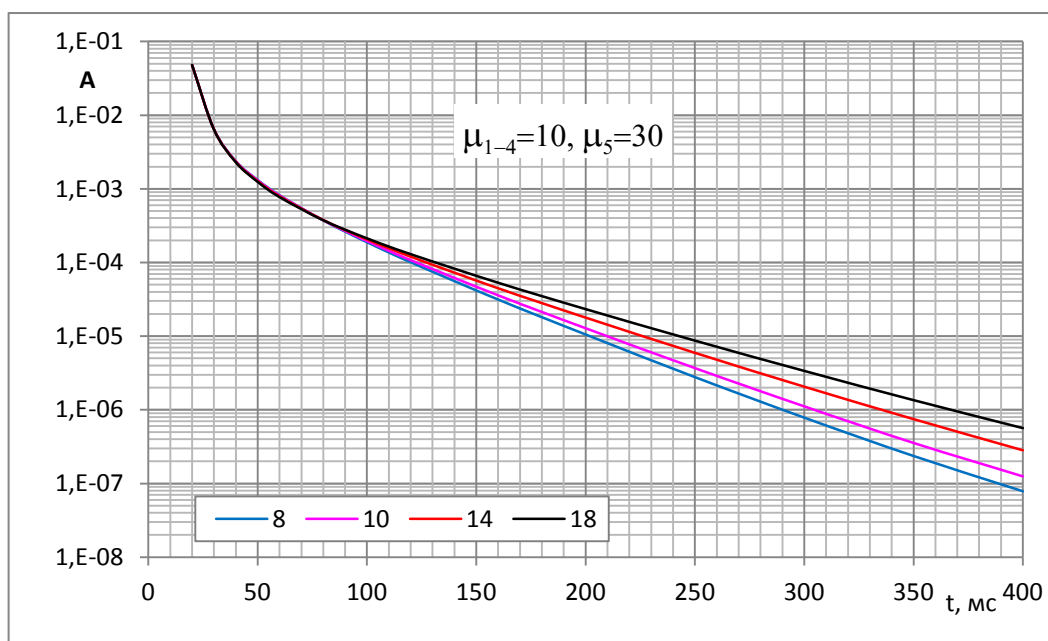
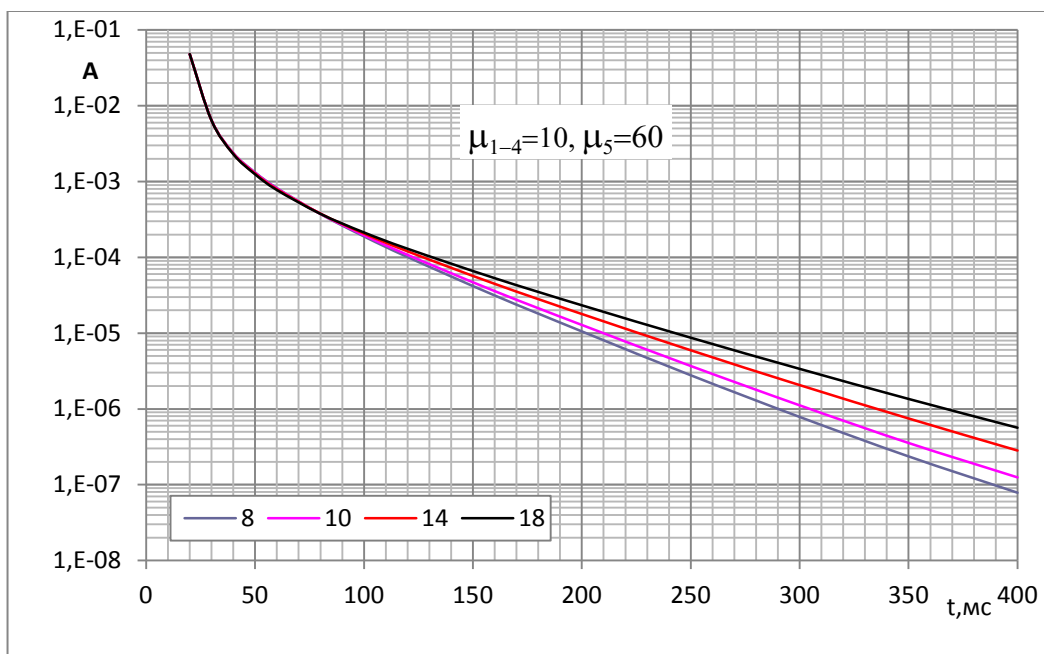
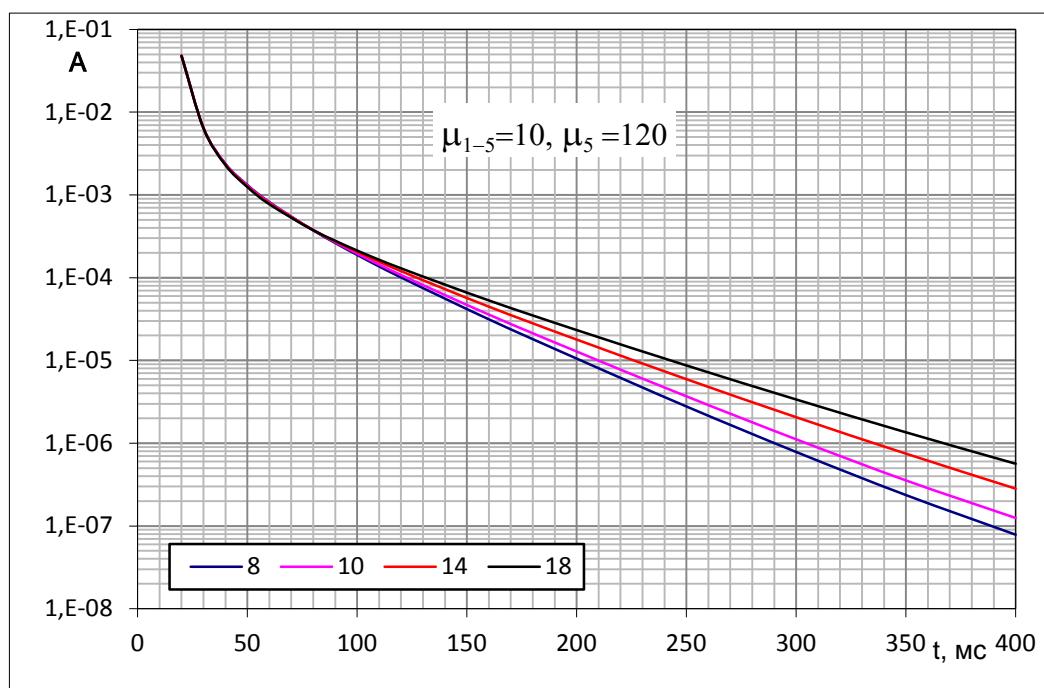
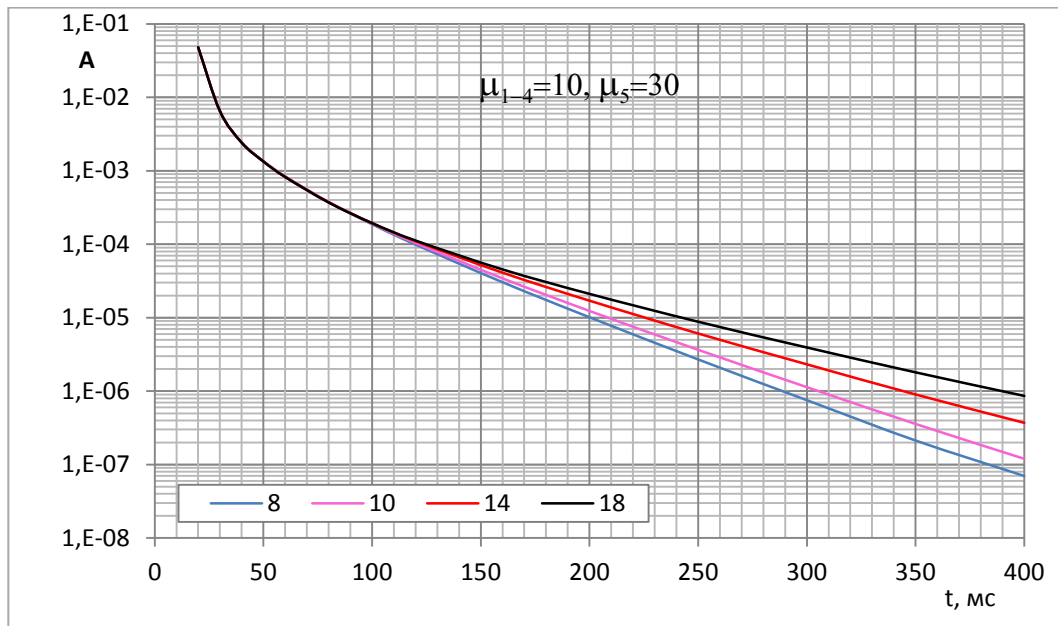
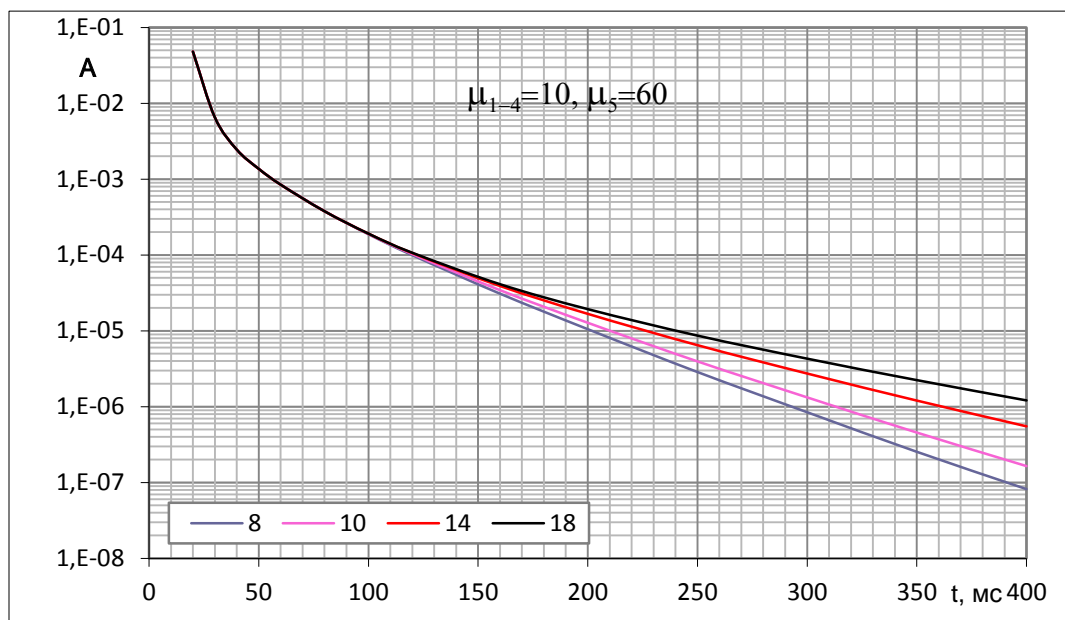


Рисунок 2.23 – КС для модели № 2, $\mu_5=30$

Рисунок 2.24 – КС для модели № 2, $\mu_5=60$ Рисунок 2.25 – КС для модели № 2, $\mu_5=120$

Рисунок 2.26 – КС для модели № 1, $\mu_5=30$ Рисунок 2.27 – КС для модели № 1, $\mu_5=60$

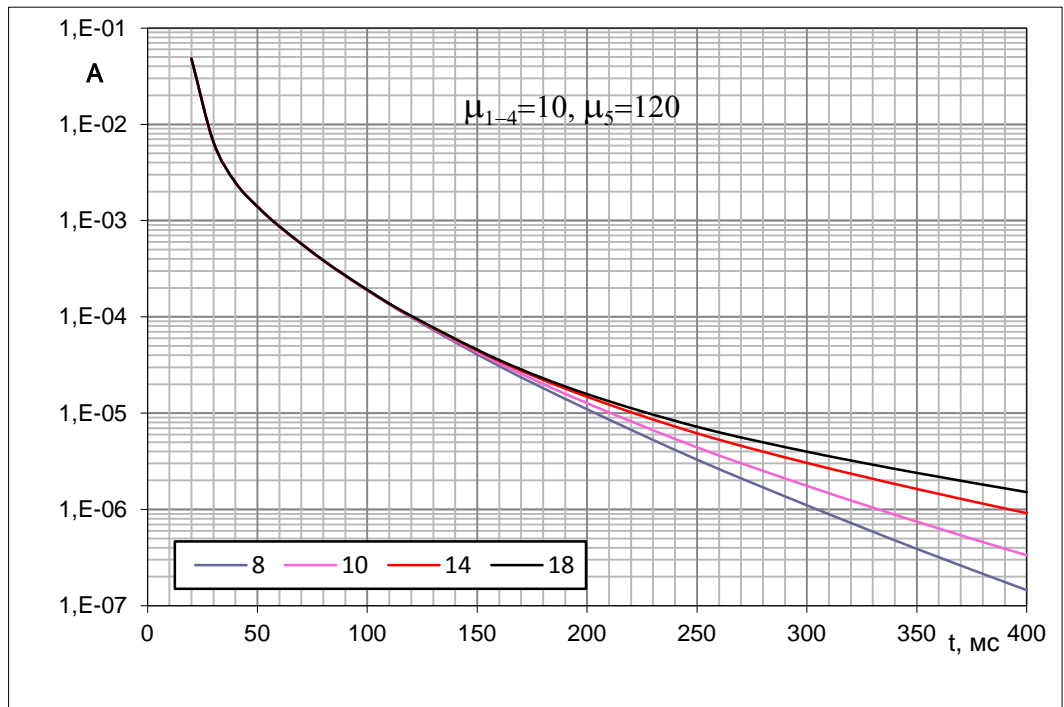


Рисунок 2.28 – КС для модели № 1, $\mu_5=120$

На рисунках 2.29–2.31 приведены кривые спада для модели № 1 при $\mu_{1-4}=40$. Длительность импульса 1 200 мс.

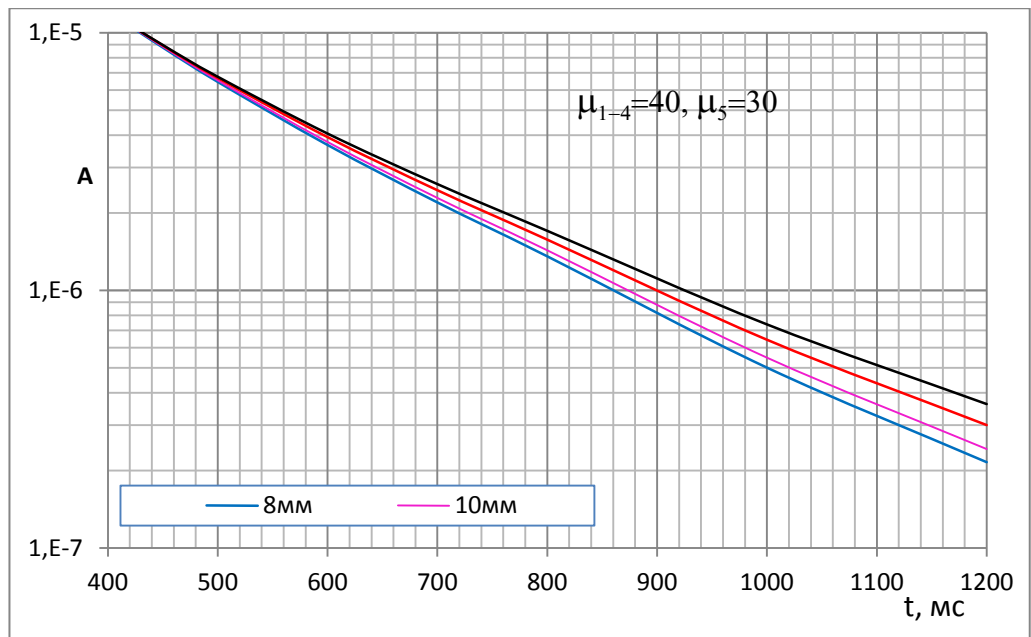


Рисунок 2.29 – КС для модели № 1, $\mu_{1-4}=40$, $\mu_5=30$

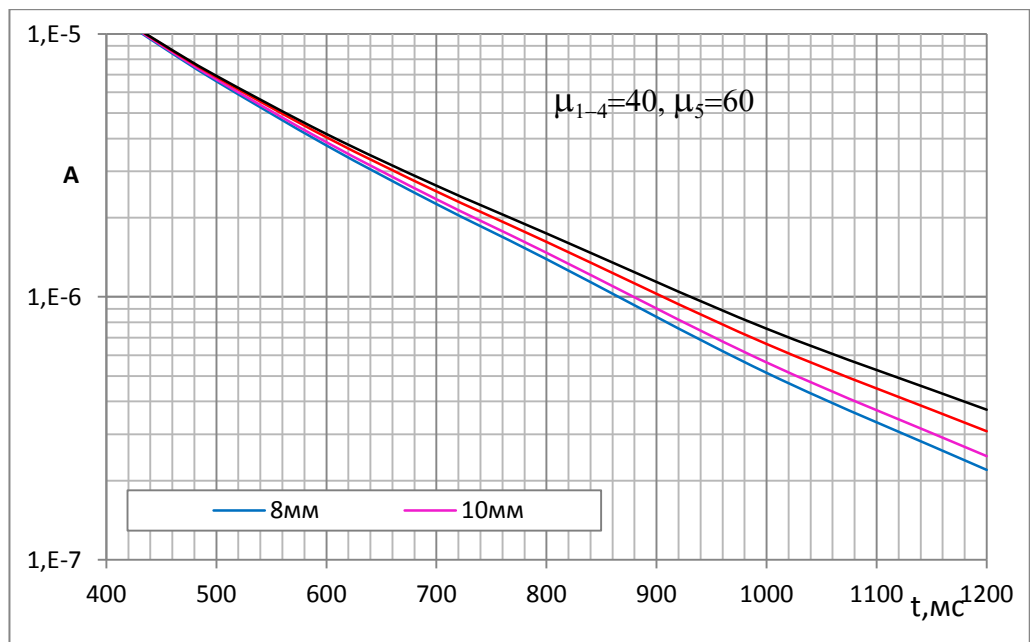


Рисунок 2.30 – КС для модели № 1, $\mu_{1-4}=40$, $\mu_5=60$

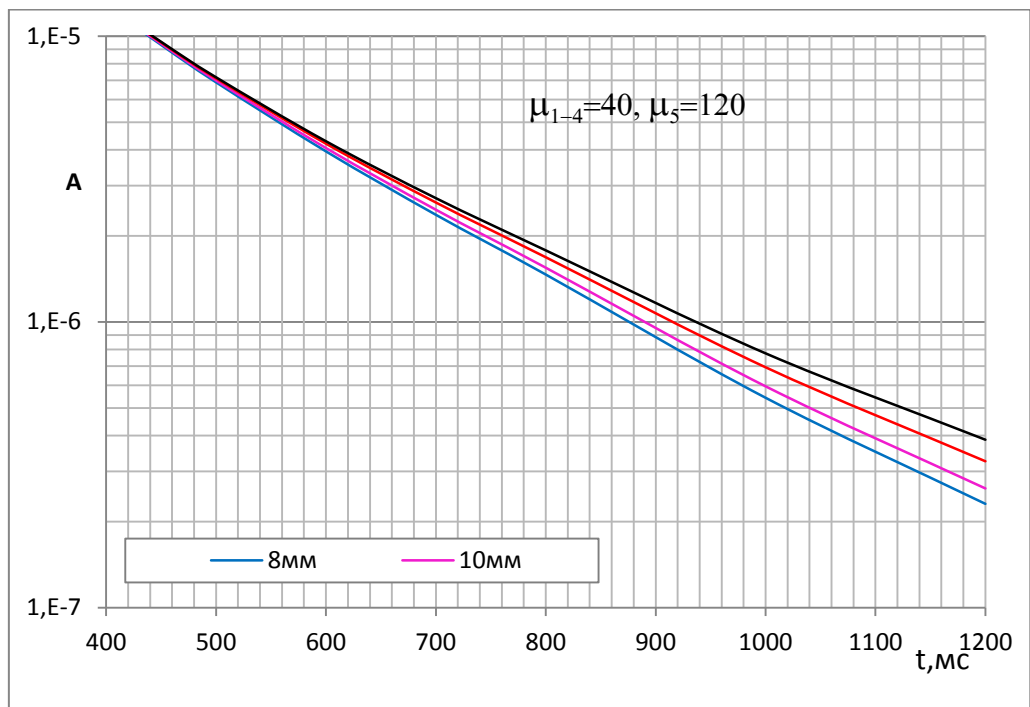


Рисунок 2.31 – КС для модели № 1, $\mu_{1-4}=40$, $\mu_5=120$

На рисунках 2.32–2.34 приведены кривые спада для модели № 1 при $\mu_{1-4}=60$.
Длительность импульса 1 600 мс.

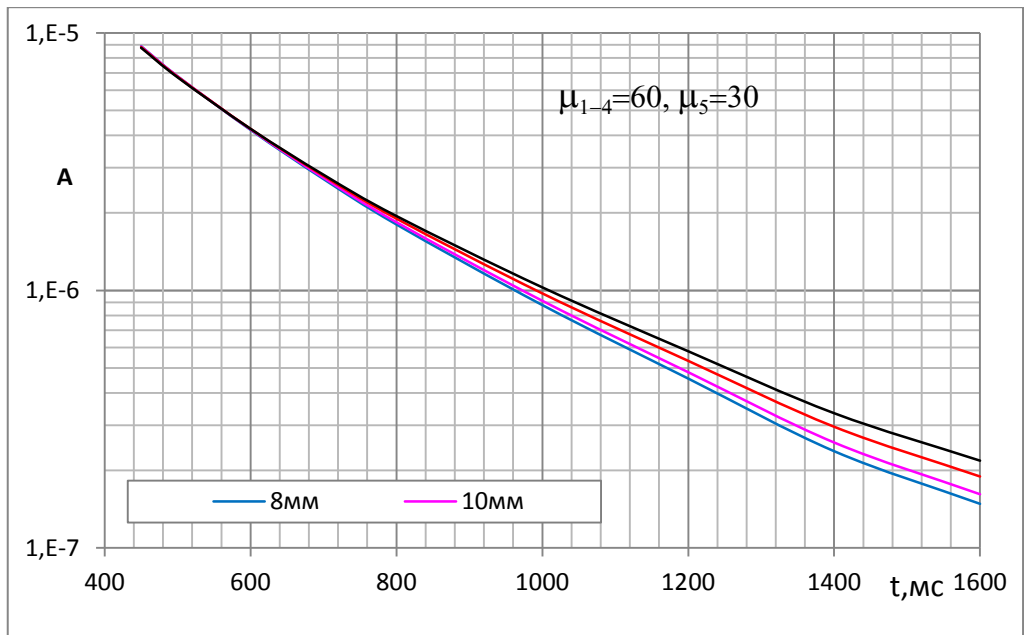


Рисунок 2.32 – КС для модели № 1, $\mu_{1-4}=60$, $\mu_5=30$

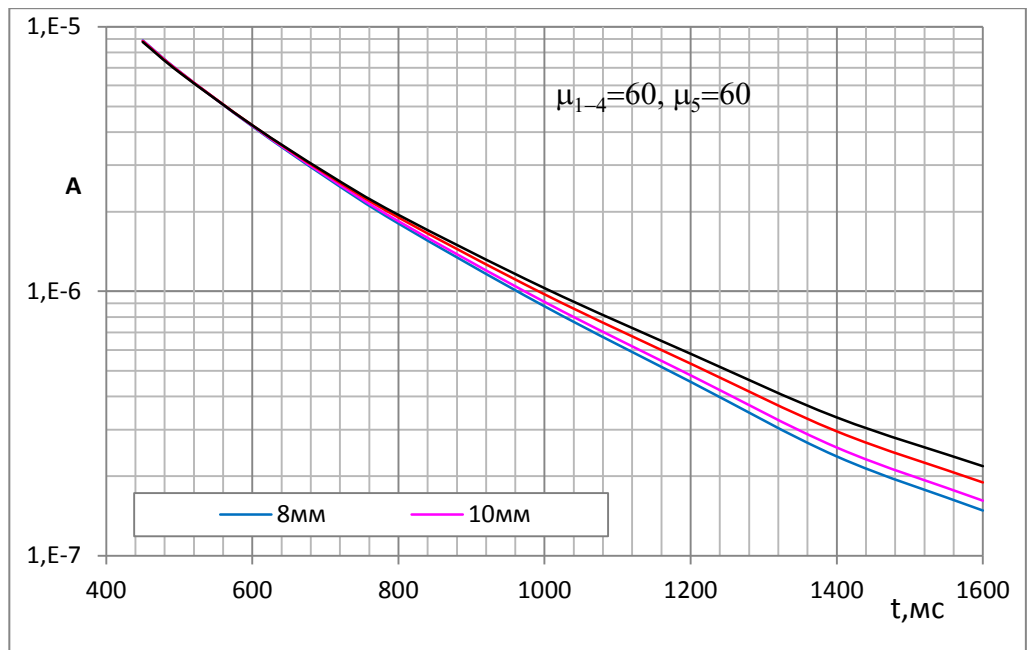


Рисунок 2.33 – Кривые спада для модели № 1, $\mu_{1-4}=60$, $\mu_5=60$

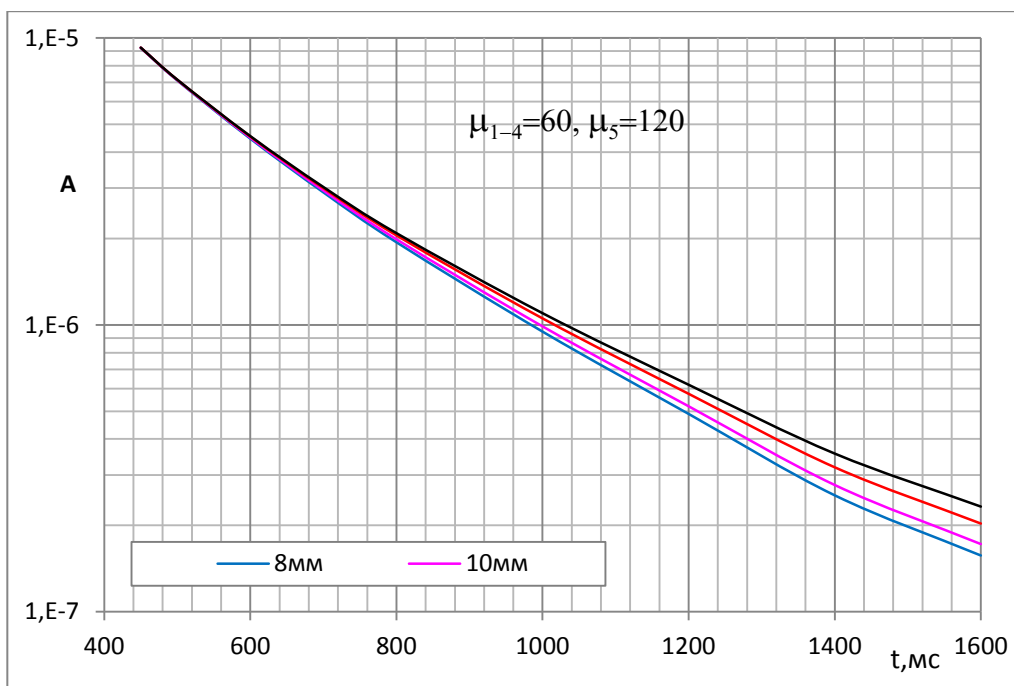


Рисунок 2.34 – КС для модели № 1, $\mu_{1-4}=60, \mu_5=120$

Пример чувствительности к пятой колонне показан на рисунках 2.35–2.36 для моделей 1, 2 при $\omega_r=3,9$ Гц. С увеличением диаметра пятой колонны с 500 мм до 600 мм η падает в 1,3 раза.

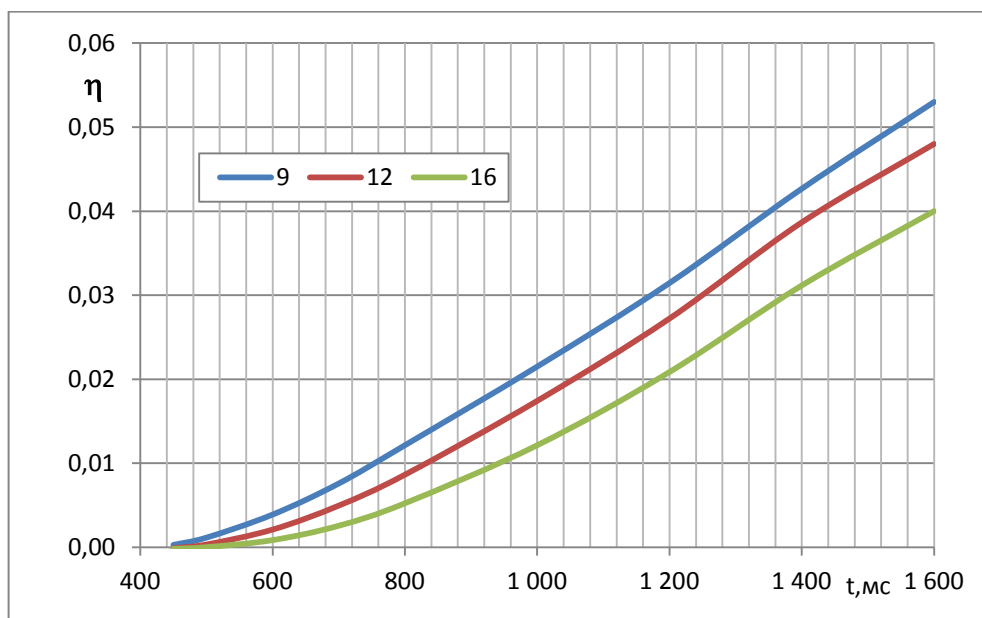


Рисунок 2.35 – Чувствительность к пятой колонне, модель 1

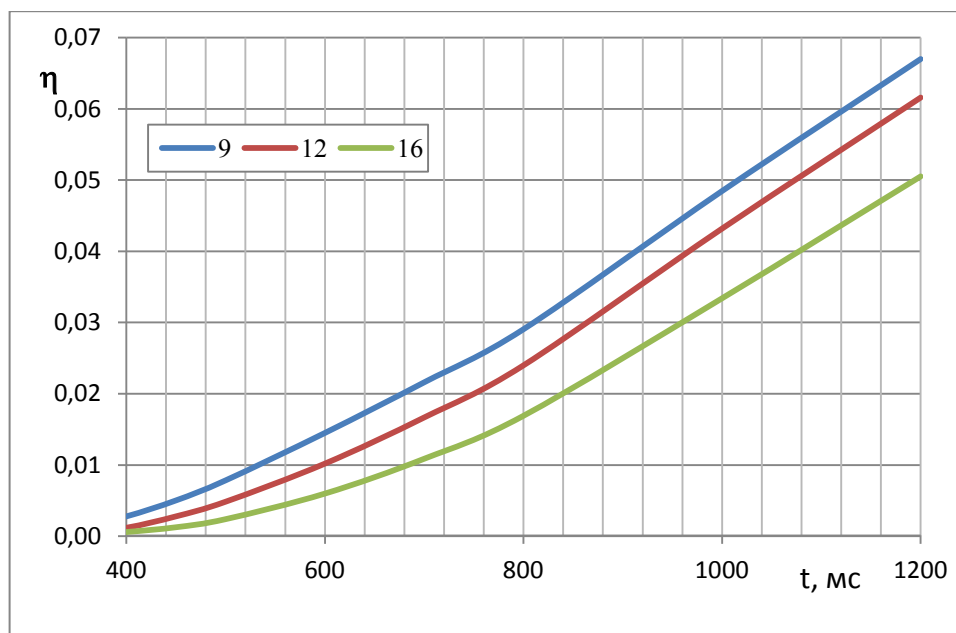


Рисунок 2.36 – Чувствительность к пятой колонне, модель 2

2.4 Оценка погрешности определения толщины колонн

Оценка прогнозируемой погрешности определения толщины стенки колонн основана на анализе матрицы производных. Рассмотрим окончательные уравнения, связывающие вектор погрешностей определения геометрических и электромагнитных характеристик колонн Δp_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:

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

\mathbf{A} – прямоугольная матрица чувствительности сигналов \mathbf{E} .

Элемент матрицы \mathbf{A} определим как

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

где E_j – ЭДС вихревых токов на j -том времени, 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.

В таблице 2.7 приведены результаты расчётов погрешности определения толщины для одноколонной модели диаметрами 508 и 600 мм. Для модели диаметром 508 мм погрешность достигает 5,18 % при $\mu=60$, $T=18$ мм, для модели диаметром 600 мм погрешность 6,541 % при $\mu=60$, $T=18$ мм.

Таблица 2.7. Погрешности определения толщины в одноколонной модели, %

μ	D=508 мм				D=600 мм			
	Толщина колонны, мм							
	8	10	14	18	8	10	14	18
10	1.417	1.553	1.642	1.727	1.605	1.807	1.922	2.034
20	1.552	1.949	2.133	2.3	1.779	2.297	2.526	2.746
30	1.74	2.407	2.681	2.957	2.013	2.861	3.205	3.58
40	1.964	2.894	3.271	3.683	2.289	3.465	3.964	4.535
60	2.475	3.934	4.542	5.18	2.923	4.795	5.658	6.541

В таблице 2.8 приведены результаты расчётов погрешности определения толщины (ΔT) для двухколонной модели. Диаметр первой трубы $D_1=324$ мм, толщина стенки 10 мм, диаметр второй колонны $D_2=600$ мм, μ_1 – магнитная проницаемость первой трубы, μ_2 – второй трубы. Погрешность ΔT_2 растет с увеличением магнитной проницаемости металла первой колонны и толщины второй колонны. Для модели с параметрами $\mu_1=40$, $\mu_2=60$ $\Delta T_2=32\%$ при длительности импульса тока возбуждения $\Delta t=100$ мс и $\Delta T_2=8\%$ при $\Delta t=200$ мс. Поскольку длительность переходного процесса пропорциональна произведению $\mu \cdot \sigma \cdot T$, то можно сделать выводы, что погрешность ΔT_2 растет с увеличением толщины стенки первой колонны T_1 и электропроводностью её металла.

Таблица 2. Погрешность определения толщины второй колонны (508 мм)

$\Delta t=100$ мс					$\Delta t=200$ мс			
μ_2	8 мм	10 мм	14 мм	18 мм	8 мм	10 мм	14 мм	18 мм
$\mu_1 = 10$								
10	4	3.734	3.492	3.466	1.59	1.384	1.205	1.221
20	4.204	4.047	4.045	4.403	1.55	1.363	1.261	1.411
30	4.453	4.42	4.722	5.602	1.525	1.365	1.366	1.677
40	4.736	4.827	5.5	6.993	1.515	1.387	1.506	1.995
60	5.369	5.755	7.282	10.06	1.525	1.485	1.851	2.72
$\mu_1=20$								
10	5.477	5.092	4.769	4.867	1.811	1.636	1.565	1.697
20	5.749	5.5	5.557	6.301	1.797	1.652	1.687	2.001
30	6.067	5.978	6.516	8.12	1.796	1.689	1.856	2.398
40	6.419	6.515	7.623	10.29	1.807	1.754	2.064	2.871
60	7.189	7.688	10.19	14.94	1.855	1.901	2.562	3.975
$\mu_1=30$								
10	7.087	6.617	6.337	6.665	2.126	2.003	2.055	2.319
20	7.446	7.172	7.48	8.827	2.139	2.055	2.252	2.773
30	7.852	7.808	8.855	11.61	2.163	2.129	2.503	3.361
40	8.293	8.549	10.44	14.91	2.198	2.247	2.804	4.067
60	9.252	10.06	14.16	21.97	2.294	2.45	3.521	5.726
$\mu_1=40$								
10	8.882	8.405	8.237	8.848	2.551	2.491	2.673	3.096
20	9.375	9.188	9.878	12.06	2.588	2.584	2.963	3.759
30	9.908	10.06	11.84	16.27	2.638	2.701	3.323	4.621
40	10.49	11.06	14.13	21.4	2.704	2.873	3.755	5.67
60	11.69	13.09	19.48	31.98	2.848	3.164	4.77	8.13

В таблице 2.9 приведены результаты математического моделирования для трёхколонной модели. Компоновка включает первую трубу диаметром $D_1=178$ мм, $T_1=10$ мм, вторую – $D_2=245$ мм, $T_2=10$ мм и третью – $D_3=600$ мм. μ_1, μ_2, μ_3 – эффективная магнитная проницаемость 1, 2 и 3-й труб.

Таблица 2.9. Погрешность определения толщины третьей колонны, %

$\Delta t=200$ мс					$\Delta t=400$ мс			
μ_3	8 мм	10 мм	14 мм	18 мм	8 мм	10 мм	14 мм	18 мм
$\mu_{1,2}=10$								
10	6.891	6.067	5.254	5.014	2.262	1.938	1.617	1.512
20	7.103	6.397	5.9	6.125	2.202	1.904	1.651	1.629
30	7.368	6.801	6.728	7.559	2.163	1.893	1.731	1.808
40	7.674	7.28	7.7	9.227	2.142	1.921	1.841	2.029
60	8.384	8.399	9.942	12.91	2.143	2.017	2.12	2.543
$\mu_{1,2}=20$								
10	10.36	9.226	8.289	8.207	2.915	2.566	2.251	2.176
20	10.68	9.766	9.414	10.15	2.905	2.587	2.354	2.4
30	11.08	10.42	10.82	12.62	2.912	2.632	2.499	2.697
40	11.53	11.18	12.44	15.49	2.93	2.693	2.677	3.049
60	12.6	12.97	16.19	21.99	3.002	2.866	3.11	3.896
$\mu_{1,2}=30$								
10	14.97	13.64	12.68	12.84	3.787	3.397	3.085	3.102
20	15.53	14.56	14.52	15.94	3.812	3.466	3.274	3.48
30	16.18	15.64	16.72	19.8	3.855	3.558	3.51	3.96
40	16.91	16.84	19.21	24.31	3.909	3.669	3.785	4.532
60	18.57	19.58	24.89	35.11	4.05	3.938	4.44	5.915
$\mu_{1,2}=40$								
10	21.41	19.83	18.7	18.8	4.916	4.497	4.225	4.344
20	22.39	21.29	21.43	23.18	4.991	4.618	4.52	4.911
30	23.41	22.91	24.52	28.57	5.063	4.763	4.86	5.617
40	24.49	24.68	28.11	35.1	5.15	4.929	5.284	6.462
60	26.81	28.57	36.32	51.9	5.338	5.319	6.259	8.56

Максимальная погрешность определения толщины третьей колонны модели с параметрами $\mu_{1,2}=40$ и $\mu_3=60$, $T_3=18$ мм при длительности импульса тока 200 мс – 52 %. При увеличении длительности импульса тока до 400 мс погрешность определения толщины третьей колонны падает до 8,6%.

Результаты оценки погрешности определения толщины для четырёхколонной модели – $D_1=114$ мм, $D_2=178$ мм, $D_3=324$ мм, $D_4=508$ мм при длительности импульса тока 1000 мс приведены в таблице 2.10. Максимальная погрешность $\Delta T=21$ % при $\mu_{1,2,3}=40$, $\mu_4=60$, $T_4=18$ мм, а минимальная – при $\mu_{1,2,3}=10$, $\mu_4=10$,

$T_4=18$ мм, $\Delta T=8,5$ %.

Таблица 2.10. Погрешность определения толщины четвертой колонны

Толщина стенки, мм								
μ_4	8	10	14	18	8	10	14	18
$\mu_{1,2,3}=10$				$\mu_{1,2,3}=30$				
10	3.573	3.036	2.569	2.449	12.16	10.69	9.12	8.367
20	3.536	3.041	2.691	2.73	12.23	10.92	9.601	9.126
30	3.525	3.078	2.873	3.09	12.32	11.19	10.14	10.01
40	3.531	3.143	3.1	3.497	12.51	11.5	10.72	10.94
60	3.596	3.339	3.643	4.378	12.92	12.18	11.98	13.18
$\mu_{1,2,3}=20$				$\mu_{1,2,3}=40$				
10	6.907	6.106	5.368	5.087	18.27	15.84	13.29	12.18
20	6.959	6.261	5.718	5.631	18.41	16.2	14.06	13.47
30	7.024	6.46	6.122	6.246	18.56	16.57	14.89	15
40	7.169	6.693	6.561	6.912	18.74	16.97	15.78	16.89
60	7.469	7.179	7.521	8.502	19.18	17.84	17.83	21.05

Для пятиколонной модели (таблица 2.12) максимальная погрешность 32,27 % при $\mu_{1,2,3,4}=40$, $\mu_5=60$, минимальная – 3,5 % при $\mu_{1,2,3,4}=10$, $\mu_5=10$, длительность импульса 1 600 мс.

Магнитная проницаемость пятой колонны меняется от 10 до 60 ед. и задана в таблице 2.13, для 1–4-й колонн магнитная проницаемость ($\mu_{1,2,3,4}$) меняется от 10 до 40 ед.

Таблица 2.11 Параметры пяти колонной модели

№ колонны	D, мм	T, мм
1	114	9
2	178	10
3	245	10
4	324	10
5	600	8, 10, 14, 18

Таблица 2.12. Погрешность определения толщины пятой колонны, %

	$\Delta t=1\ 200\ \text{мс}$				$\Delta t=1\ 600\ \text{мс}$			
T_5	8 мм	10 мм	14 мм	18 мм	8 мм	10 мм	14 мм	118 мм
μ_5	$\mu_{1,2,3,4}=10$							
10	7.123	6.085	5.033	4.561	6.227	5.188	4.07	3.523
20	7.096	6.155	5.278	4.974	6.178	5.191	4.162	3.716
30	7.134	6.284	5.584	5.444	6.169	5.229	4.297	3.976
40	7.205	6.443	5.923	5.952	6.184	5.292	4.461	4.284
μ_5	$\mu_{1,2,3,4}=20$							
10	16.55	14.08	11.43	10.15	11.94	10.11	8.151	7.241
20	16.35	14.15	11.87	10.96	11.8	10.11	8.413	7.761
30	16.28	14.48	12.38	11.89	11.74	10.14	8.747	8.383
40	16.29	14.73	12.95	12.93	11.72	10.27	9.136	9.078
μ_5	$\mu_{1,2,3,4}=40$							
10	45.08	39.28	32.92	30.98	33.56	29.08	24.47	21.76
20	46.48	41.36	37.18	36.63	33.61	29.72	26.4	23.99
30	47.06	42.76	40.54	42.82	33.35	30.05	27.76	26.27
40	47.38	43.94	43.73	48.94	33.14	30.36	28.7	28.39

Выводы по главе 2

- Разработано программное обеспечение для моделирования переходных процессов в многоколонных скважинах для труб большого диаметра. Проведены расчёты кривых спада для одно-, двух-, трёх-, четырёхколонных и пятиколонных моделей.

- Для одноколонных моделей большого диаметра (245–610 мм) для оценки параметров нужно использовать временной интервал измерений от 10 до 60–180 мс. При этом погрешность вычисления толщины растёт с увеличением магнитной проницаемости стали, диаметра колонны и её номинальной толщины, для трубы диаметром 610 мм лежит в диапазоне 1,6 % – 6,5 % при изменении μ от 10 до 60 и номинальной толщины от 8 до 18 мм.

- В двухколонных скважинах, обсаженных трубами большого диаметра, необходимо увеличить время регистрации переходных процессов до 200 мс. Тогда прогнозируемая погрешность для второй трубы диаметром 610 мм будет лежать в диапазоне 1,59–8,13 % от номинального значения толщины.

- Для исследования третьей колонны временной интервал в диапазоне 100–400 мс, погрешность вычисления толщины трубы с увеличением μ от 10 до 60 и толщины от 8 до 18 мм меняется в диапазоне 2,26–8,56 %.

- Для четырёхколонной конструкции время регистрации целесообразно увеличить до 400–1000 мс.

- Изменение магнитной проницаемости второй и более колонн регистрируется на более поздних временах КС, чем при изменении толщины этих колонн.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ-ТОЛЩИНОМЕТРИИ МНОГОКОЛОННЫХ СКВАЖИН

3.1 Алгоритм вычисления толщины стенки труб в многоколонных скважинах

3.1.1 Формирование базы данных

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

Магнитная проницаемость (μ) обсадных колонн нефтегазовых скважин находится в диапазоне от 10 до 60 отн. ед., а удельная электропроводность (σ) от 3 МСм/м до 8 МСм/м. Толщина стенки труб может варьировать от 5 до 9 мм для НКТ, от 7 до 12 мм для эксплуатационных колонн, от 9 до 18 мм для технических обсадных колонн при диаметрах от 73 до 610 мм.

Электромагнитные свойства металла могут изменяться в процессе эксплуатации колонн. При оценке технического состояния колонн важно выявить эти трубы, чтобы исключить ошибки.

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

Для формирования базы данных, обеспечения точности определения толщины стенок колонн проводятся измерения прибором серии МИД кривых спада для опорных моделей, имитирующих одно-, двух-, трёх-, четырёх- и пятиколонные скважины, рассчитаны кривые спада для математических моделей с шагом по толщине для каждой колонны $\Delta h=0,5$ мм для $\mu - 10, 20, 30, 40, 50, 80, 150$ при $\sigma=3 \cdot 10^6$ 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-, трёх-, четырёх- 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 3.1 приведены примеры измерений кривых спада ЭДС переходных процессов в эталонных моделях. В первом случае (а) измерения проводились в одной, двух, трёх и четырёх колоннах при условии, что диаметр первой колонны с увеличением числа колонн уменьшается. Вторая модель (б) имитирует двух-, трёх- и четырёхколонную скважины при условии, что прибор всегда находится в НКТ.

Расчет кривых спада при создании базы данных проводится по алгоритму, приведённому в работах [9, 10]. 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 3.2 приведены примеры теоретических кривых спада для четырёхколонных (а, б) и пятиколонных (в, г) моделей. Шифр кривых – толщина внешней колонны, шифр КС – магнитная проницаемость труб.

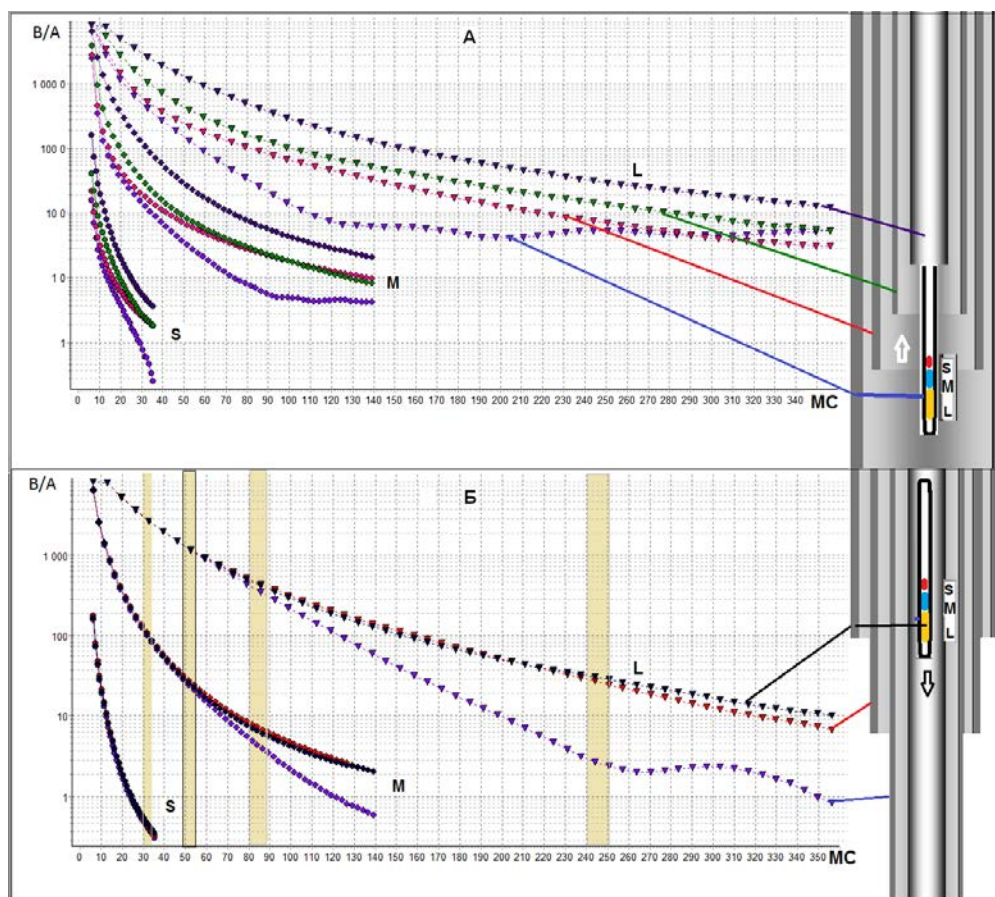


Рисунок 3.1 – Кривые спада для эталонных моделей

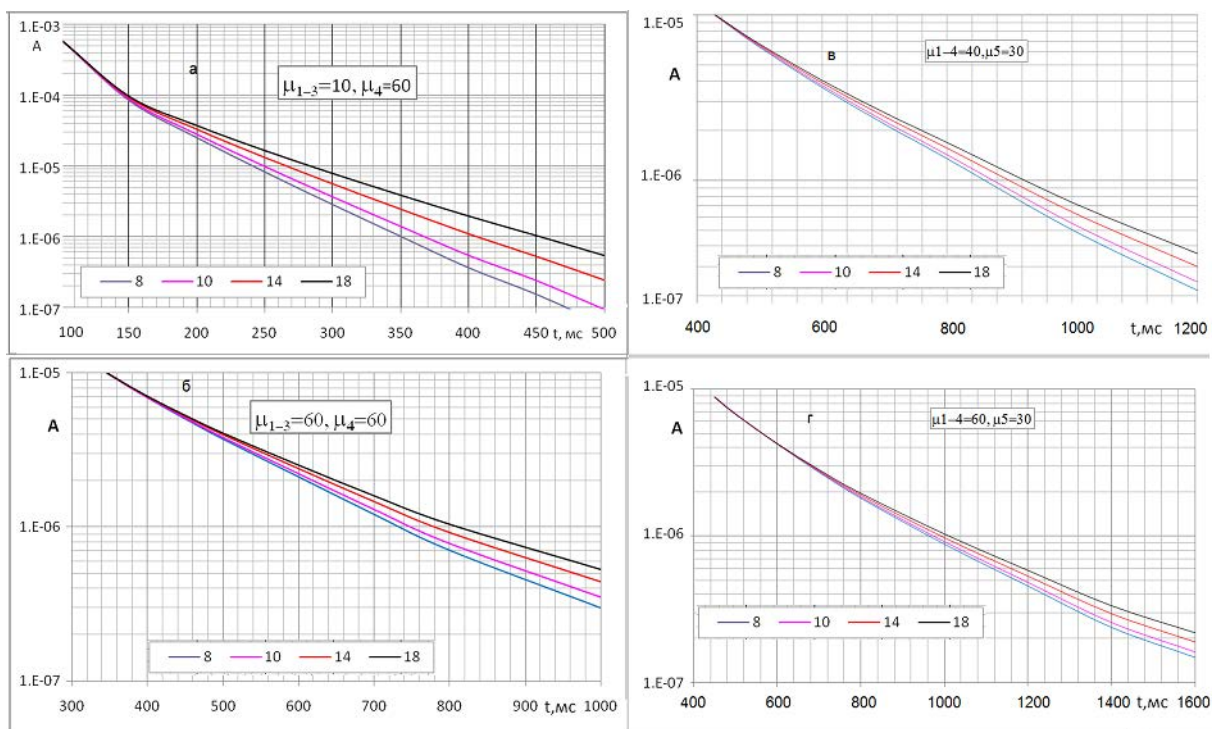


Рисунок 3.2 – Пример теоретических кривых КС из базы данных

3.1.2 Метод расчёта толщины колонн и результаты тестирования

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.

При этом \vec{X} определим из условия

$$\Psi = \min \left\| \frac{\vec{Y}_k - F(\vec{X})}{\delta \vec{Y}_k + \varepsilon} \right\| = \sum_{j=1}^M \left(\frac{Y_j - F(\vec{X})}{\delta Y_j + \varepsilon} \right)^2, \quad (3.1)$$

где ε, δ – абсолютная и относительная погрешности измерений.

Основное требование, которое было предъявлено к разрабатываемому алгоритму, – это поиск минимума функции (3.1) при слабых начальных приближениях за ограниченное число итераций, которое бы обеспечивало приемлемое для массовой обработки время счета.

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 ре-

зультатов.

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 четвёртой колонн на основе решения обратной задачи для четырёхколонной 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 четырёх внутренних колонн известны.

Для оценки возможности метода были смоделированы измерения для различных конструкций с параметрами μ , σ , D . Затем проводилась инверсия этих кривых с учетом погрешностей в измерениях (2 %). В таблице 3.1 приведены результаты определения параметров модели, где индекс «и» обозначает результат вычисления.

Таблица 3.1. Результаты решения обратной задачи для модели:

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

$T_{\text{ТК}}$, мм	$T_{\text{НКТи}}$, мм	$T_{\text{ЭК1и}}$, мм	$T_{\text{ЭК2и}}$, мм	$T_{\text{ТКи}}$, мм	$\mu_{\text{ТКи}}$	$\sigma_{\text{ТКи}}$, См/м	W
6	6,07	7,85	7,46	6,52	55,2	8,68	0,868
8	6,08	8,04	7,51	8,37	52,9	8,05	0,883
10	6,05	7,68	7,65	10,04	51	7,95	0,858
12	6,03	8,10	7,71	12,5	49,6	7,9	0,813

Для конструкции ЭК в ТК средняя погрешность определения толщины стенки ТК – 0,528 мм, ЭК – 0,435 мм. Относительная средняя погрешность определения $\mu_{\text{ЭК}} - \delta\mu = 20$ %, а для $\mu_{\text{ТК}} - \delta\mu = 25$ %.

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

Предложенный метод решения обратной задачи для всей кривой позволяет с достаточной точностью определять толщину труб в двух колоннах с учётом их электромагнитных характеристик $\mu\sigma$.

В таблицах 3.2, 3.3 приведены результаты решения обратной задачи для четырёхколонной конструкции при $\delta = 2\%$ и $\varepsilon = Y_0 \cdot 1.e^{-5}$, $\mu_{\text{НКТ}} = 20$, $\mu_{\text{ЭК1}} = 40$, $\mu_{\text{ЭК2}} = 40$, $\sigma_{\text{НКТ}} = \sigma_{\text{ЭК1}} = \sigma_{\text{ЭК2}} = 8 \cdot 10^6$ См/м, при этом определялась толщина стенки (Т) четырёх колонн, μ и σ ТК: $T_{\text{ТК}}$, $T_{\text{ЭК1}}$, $T_{\text{ЭК2}}$, $T_{\text{НКТ}}$, $\mu_{\text{ТК}}$, $\sigma_{\text{ТК}}$ – соответственно истинные значения толщины ТК, ЭК1, ЭК2 и НКТ; $T_{\text{ТКи}}$, $T_{\text{ЭК1и}}$, $T_{\text{ЭК2и}}$, $T_{\text{НКТи}}$, $\mu_{\text{ТКи}}$, $\sigma_{\text{ТКи}}$ – результаты решения обратной задачи $W = (\Psi)^{1/2}$.

Погрешность определения толщины стенки НКТ не превышает 0,08 мм, ЭК1 – 0,4 мм, ЭК2 – 1 мм, ТК – 1,8 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 3.2. Результаты решения обратной задачи для модели:

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

$T_{\text{ТК}}$, мм	$T_{\text{НКТи}}$, мм	$T_{\text{ЭК1и}}$, мм	$T_{\text{ЭК2и}}$, мм	$T_{\text{ТКи}}$, мм	$\mu_{\text{ТКи}}$	$\sigma_{\text{ТКи}}$, МСм/м	W
6	8,05	9,59	9,31	6,85	56,4	8,43	0,87
8	8,15	9,79	9,47	8,76	54,5	8,44	0,912
10	8,28	10,0	9,62	10,08	53,1	8,34	0,898
12	8,33	10,25	9,74	12,08	52,1	8,32	0,882

Таблица 3.3. Результаты решения обратной задачи для 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

ТК, мм	$T_{\text{НКТ}i}$, мм	$T_{\text{ЭК1}i}$, мм	$T_{\text{ЭК2}i}$, мм	$T_{\text{ТК}i}$, мм	$\mu_{\text{ТК}i}$	$\sigma_{\text{ТК}i}$, МСм/м	W
6	4,02	11,7	11,0	7,37	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	13,8	54,2	7,91	0,932

Предложенный метод решения обратной задачи для всей кривой позволяет с достаточной точностью определять толщину труб в пяти колоннах с учётом их электромагнитных характеристик $\mu\sigma$.

Предложенный алгоритм лёг в основу программно-методического обеспечения интерпретации данных дефектоскопии многоколонных скважин.

Для оценки адекватности математической модели реальным измерениям была проведена интерпретация результатов измерений на физических модельных трубах.

Трёхколонные модели

Толщина третьей колонны вычисляется по кривым спада длинного зонда аппаратуры МИД-4. На рисунке 3.3 приведены результаты вычисления толщины для трёхколонных моделей:

1. НКТ диаметром 73 мм и эксплуатационная колонна диаметром 146 мм не имеют износа, вторая эксплуатационная колонна имитирует износ с остаточной толщиной 3,8 мм и с остаточной толщиной 11,0 мм. Максимальная погрешность вычисления толщины для третьей колонны не превышает 0,25 мм. Постоянные спада ($\lambda = d \ln(E(t)/dt)$) для толщины $th_1 = 11,85$ мм $\lambda_1 = 0,016$, для $th_3 = 3,8$ мм $\lambda_3 = 0,021$, $\lambda_1/\lambda_3 = 0,76$, $th_3/th_1 = 0,32$, $\eta = 0,42$. При изменении толщины на 0,85 мм постоянные спада практически совпадают $-\eta = 0,91$. Информативными являются только амплитудные характеристики.

2. Результаты определения толщины для модели трёх труб диаметром 146, 178 и 245 мм. Две первые трубы целые, третья имитирует износ стенки с остаточной толщиной 5,1 и 7,9 мм. Максимальная погрешность не превышает 0,2 мм. Постоянные спада для толщины $th_1=10,3$ мм $\lambda_1=0,0135$, $th_2=7,9$ мм $\lambda_2=0,0148$, $th_3=5,1$ мм $\lambda_3=0,0164$, $\lambda_1/\lambda_2=0,91$, $\lambda_1/\lambda_3=0,82$.

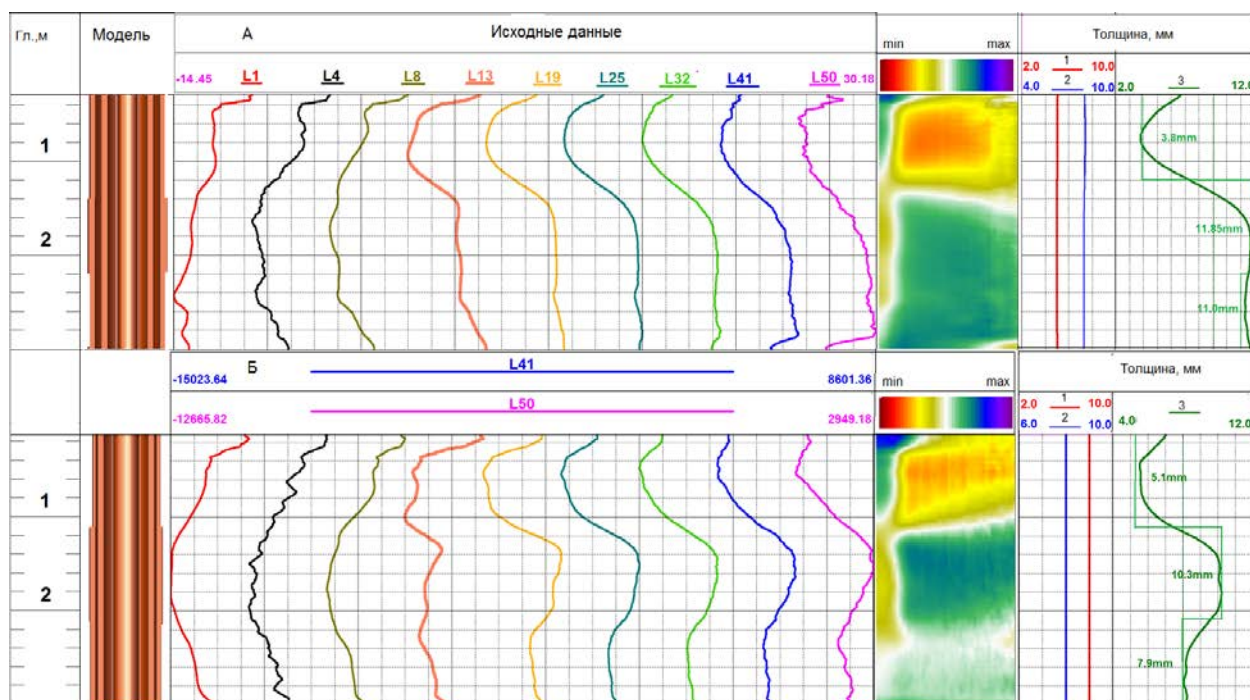


Рисунок 3.3 – Кривые спада для трёхколонной модели и определение толщины

Четырёхколонные модели

На рисунке 3.4 а приведены результаты измерений и интерпретации в четырёхколонной модели. Три первые трубы целые, а четвёртая труба имитирует износ различной интенсивности. На рисунке – результат вычисления толщины четырёх колонн (Pipe1 и Pipe2 – толщина первой и второй труб, Th3 и Th4 – толщина третьей и четвёртой труб). Максимальная погрешность вычисления толщины не превышает 0,4 мм. Постоянные спада для $th_1=10,3$ мм $\lambda_1=0,011$, $th_2=8$ мм $\lambda_2=0,012$, $th_3=5,1$ мм $\lambda_3=0,013$, $\lambda_1/\lambda_2=0,92$ $sth_2/sth_1=0,93$, $\lambda_1/\lambda_3=0,84$ $sth_3/sth_1=0,84$.

На рисунке 3.4 б приведены результаты моделирования для четырёхколонной модели. Четвёртая колонна диаметром 324 мм имитирует износ колонны с

остаточной толщиной 3,1, 10 и 6,5 мм. Максимальная погрешность не превышает 1 мм или 10 % от номинального значения толщины.

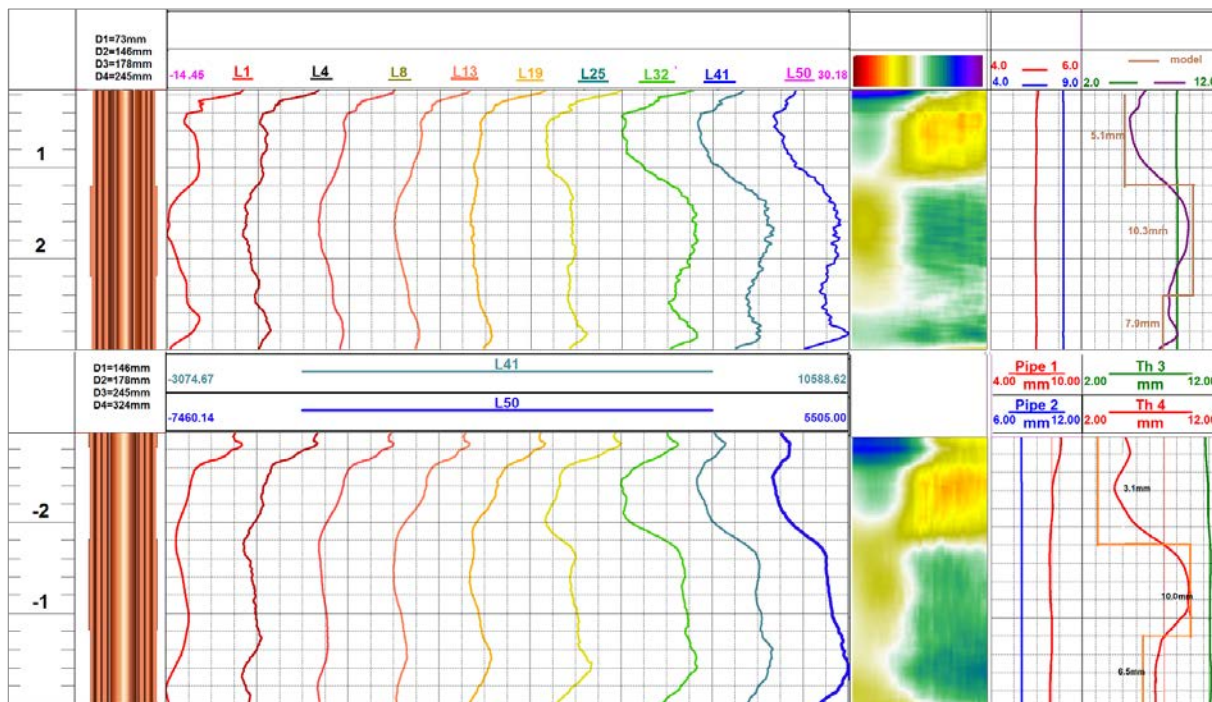


Рисунок 3.4 – Определение толщины для моделей 73 – 146 – 178 – 245 мм и 146 – 178 – 245 – 324 мм

На рисунке 3.5 приведены кривые спада переходного процесса. Для зонда длиной 480 мм при длительности импульса 400 мс чувствительность к изменению толщины четвёртой колонны $\eta=0,39$, а при длине зонда 600 мм и длительности импульса 600 мс $\eta=0,7$ (рисунок 3.6).

Максимальная погрешность определения толщины для четвёртой колонны 1,5 мм не более 15 % от номинальной толщины.

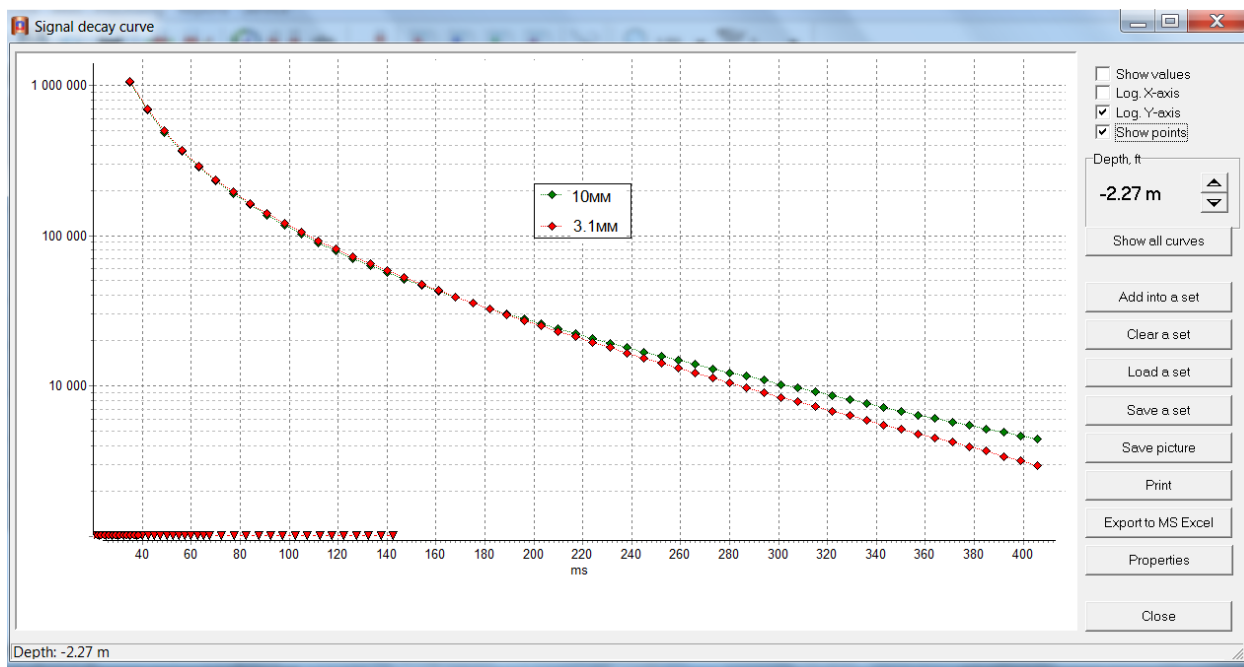


Рисунок 3.5 – Кривые спада для зонда 480 мм

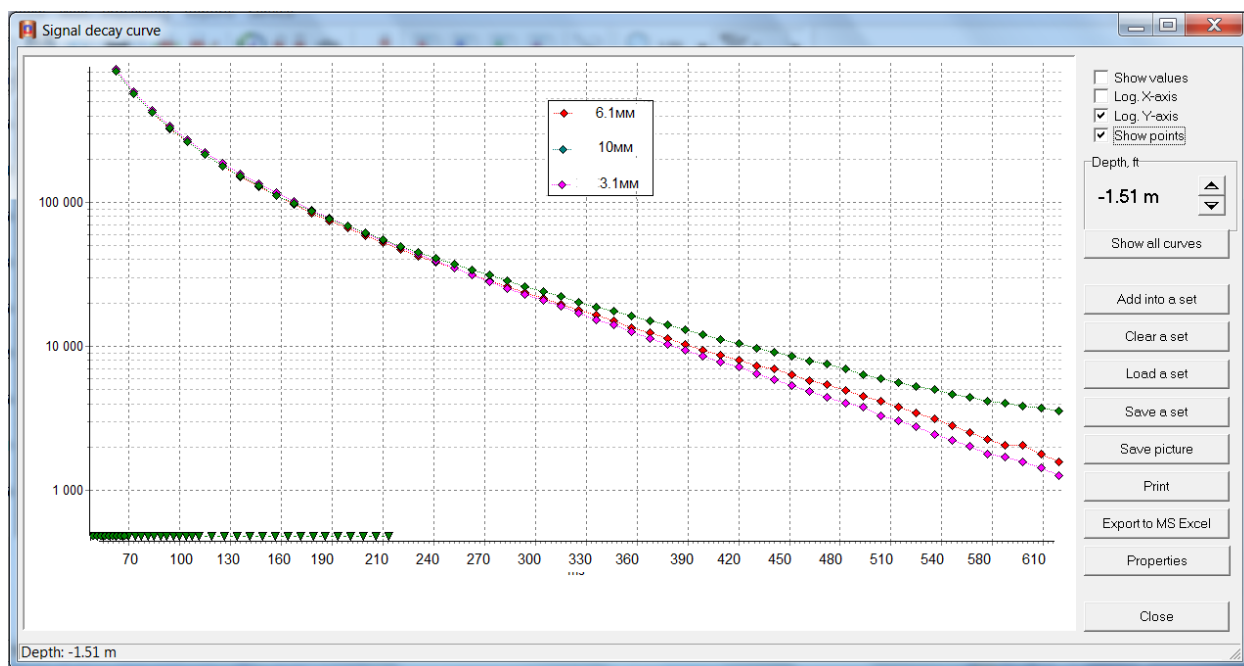


Рисунок 3.6 – Кривые спада для зонда 600 мм

Ниже приведено описание исследованных труб:

- труба № 1: $D = 73$ мм, гладкая, толщина 5,5 мм;
- труба № 7: $D = 146$ мм, гладкая, толщина 7,75 мм;

- труба № 20: $D = 245$ мм с тремя проточками длиной 1 м и толщинами стенки 11, 85, 11,0 и 3,8 мм;
- труба № 245-1: $D = 245$ мм с тремя проточками длиной 1 м и толщинами стенки 5,1, 10,3 и 7,9 мм;
- труба № 178-8: $D = 146$ мм, гладкая, толщина 9 мм;
- труба № 324-3: $D = 324$ мм с тремя проточками длиной 1 м и толщинами стенки 3,1, 10,0 и 6,5 мм;
- труба № 19а: $D = 245$ мм, гладкая, толщина 11,35 мм.

Измерения проводились прибором МИД-СМ5. Максимальная абсолютная погрешность вычисления толщины не превышала 1,5 мм, а средняя абсолютная погрешность для пятой колонны – 0,86 мм, для четвертой – 0,31 мм, для третьей – 0,23 мм.

На рисунке 3.7 приведены результаты измерений и вычисления толщины стенки для четырёхколонной (№ 1 – $D = 180$ мм, № 2 – $D = 246$ мм, № 3 – $D = 342$ мм, № 4 – $D = 430$ мм) и пятиколонной модели (№ 5 – $D = 100$ мм; параметры колонн № 1, № 2, № 3, № 4 совпадают со значениями для четырёхколонной модели).

Для четырёхколонной модели максимальное отклонение результатов расчёта толщины в первой гладкой трубе № 1 от истинных значений не превышает 0,1 мм. Максимальная абсолютная погрешность результатов расчёта толщины во второй трубе № 2 в интервале с номинальной толщиной не превышает 0,23 мм, в интервале длиной 600 мм, толщиной 2,0 мм (проточка) в центре трубы – 0,49 мм. Максимальное абсолютное отклонение результатов расчёта толщины в третьей трубе № 3 при номинальной толщине не превышает 0,45 мм, в интервале длиной 800 мм абсолютная погрешность – 0,15 мм при толщине стенки 7,0 мм. Максимальная погрешность результатов расчёта толщины в четвертой трубе № 4 при номинальной толщине не превышает 0,58 мм, в интервале длиной 1000 мм при толщине стенки 5,0 мм абсолютная погрешность – 0,49 мм.

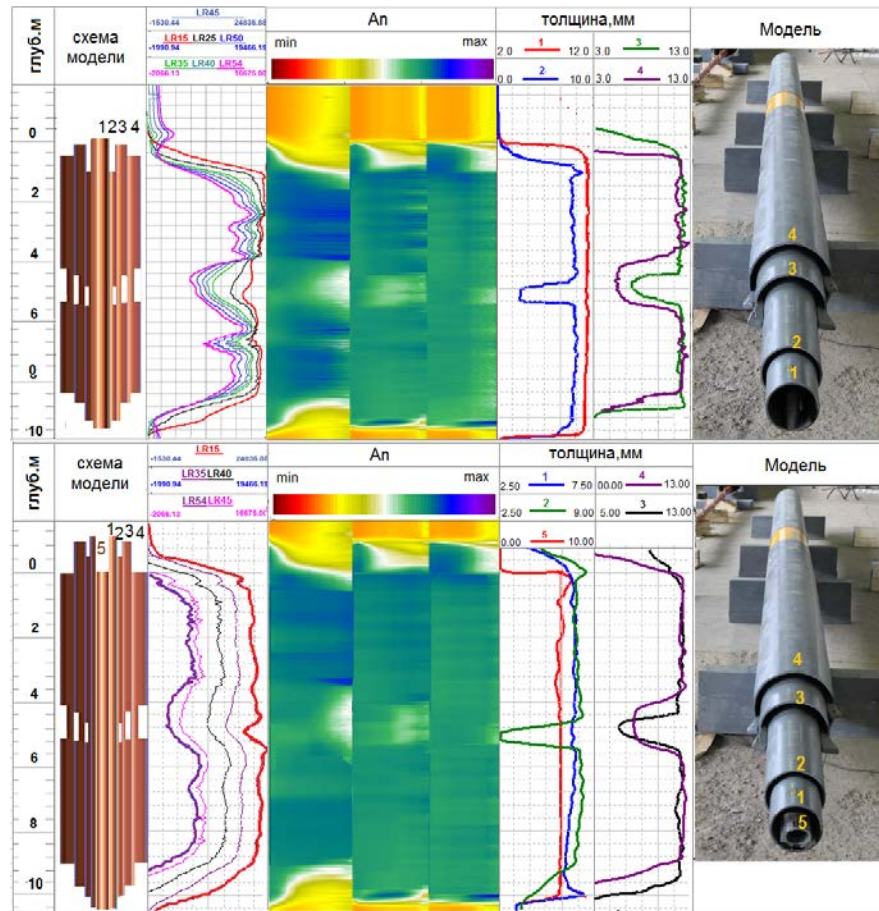


Рисунок 3.7– Результаты измерений и вычисление толщины стенки для четырёх- и пятиколонных моделей

Таблица 3.4. Результаты вычисления толщины и абсолютной погрешности её определения для внешней трубы

Определяемый параметр	№ трубы	Паспортное значение, мм	Результат, мм	Абсолютная погрешность, мм
Толщина стенки колонны $D=324$ мм через НКТ $D=73$ мм и колонну $D=146$ мм	1, 7, 324-1	5,10	5,35	0,25
		10,30	10,00	0,30
		7,90	8,10	0,20
Толщина стенки колонны $D=245$ мм через НКТ $D=73$ мм и колонну $D=146$ мм	1,7, 20	3,8	3,65	0,15
		11,85	11,63	0,22
		11,00	11,25	0,25
Толщина стенки колонны $D=245$ мм через НКТ $D=73$ мм и колонны $D=146$ мм, $D=178$ мм, $D=245$ мм	1, 7, 178-8, 245-1	5,10	5,35	0,25
		10,30	10,00	0,30
		7,90	8,30	0,40

Толщина стенки колонны $D=324$ мм через НКТ $D=73$ мм и колонны $D=146$ мм, $D=245$ мм	1, 7, 19а, 324-3	3,1 10,0 6,5	4,05 11,03 7,00	0,85 1,03 0,50
Толщина стенки колонны $D=324$ мм через колонны $D=146$ мм, $D=178$ мм, $D=245$ мм	7, 178-8, 19а 324-3	3,1 10,0 6,5	4,50 10,02 7,55	1,40 0,02 1,05
Толщина стенки колонны $D=324$ мм через НКТ $D=73$ мм и колонны $D=146$ мм, $D=178$ мм, $D=245$ мм	1, 7, 178-8, 19а, 324-3	3,1 10,0 6,5	4,05 11,03 7,00	0,85 1,03 0,50

3.2 Методика интерпретации

3.2.1 Описание аппаратуры серии МИД для исследования многоколонных конструкций скважин

Для регистрации переходных процессов вихревых токов в четырёхколонной 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. На основе теоретических исследований и физического моделирования определены параметры, количество зондов и длительности импульса тока возбуждения и время регистрации для радиального и азимутального сканирования многоколонных скважин. В таблице 3.5 приведены характеристики зондов.

Скважинная часть аппаратуры

Устройство экспериментального образца скважинного прибора МИД-4 показано на рисунке 3.8.

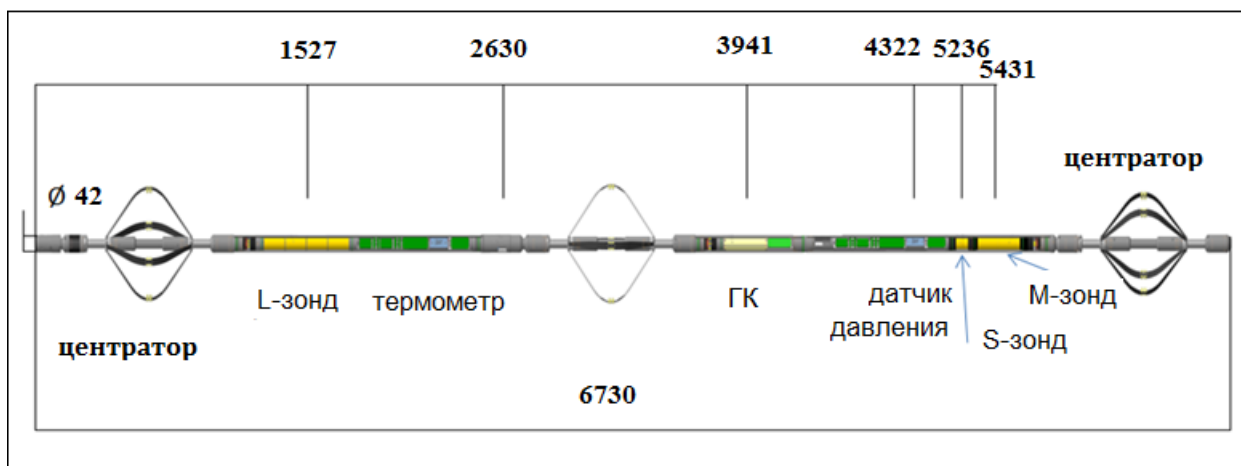


Рисунок 3.8 – Общий вид скважинного прибора МИД-4

Прибор МИД-4 состоит из следующих основных частей: длинного продольного зонда (L); среднего продольного зонда (M); короткого продольного зонда, совмещенного с короткими сканирующими датчиками (S); зонда ГК; датчика давления; термометра; блока электроники; защитного корпуса; центраторов.

Центровка прибора может быть реализована как с комплектом пружинных центраторов, так и с резиновыми, которые могут быть изготовлены дополнительно.

Таблица 3.5. Характеристики аппаратуры МИД-4

Максимальный диаметр исследуемых труб, мм	508
Количество исследуемых труб, шт.	1; 2; 3; 4; 5
Минимальный диаметр исследуемой трубы, мм	59
Максимальная суммарная толщина 5 исследуемых труб, мм	50
Количество секторов сканирования, не менее	6
Погрешность определения толщины стенок труб, % от номинальной толщины	
при исследовании 1-й колонны	±5
при исследовании 2-й колонны	±7
при исследовании 3-й колонны	±10
при исследовании 4-й колонны	±15

Минимальная протяженность дефекта типа «трещина» вдоль оси трубы, мм при исследовании 1-й трубы при исследовании 2-й трубы при исследовании 3-й трубы при исследовании 4-й трубы	1/12 периметра 1/7 периметра 1/3 периметра 1/2.5 периметра
Минимальная протяженность обнаруживаемого дефекта типа «поперечная трещина» для 1-й трубы	1/7 периметра
Разрешающая способность термометра, °С	0,01
Постоянная времени термометра, с	0,5
Температура эксплуатации, °С	от -10 до 150
Максимальное рабочее давление, МПа	100
Габаритные размеры скважинного прибора, мм – диаметр/длина	42/6735
Потребляемая мощность, Вт	не более 100

3.2.2 Описание интерфейса программного обеспечения интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии

Основное меню программы включает *рабочую область*, куда выводятся панель инструментов (1), колонка исходных кривых (2,3,4), колонка спектров (5), колонка кривых толщины (6), колонка глубин и магнитных меток (7), курсоры границ конструкции и муфт (8), строка состояния (рисунок 3.9).

Исходные кривые – кривые, считанные из входного файла и отображаемые на рабочей области без какой-либо обработки. Каждая кривая соответствует амплитуде ЭДС индукции на определенном времени регистрации переходного процесса на всем диапазоне глубин.

Спектр – трёхмерное изображение исходных данных по времени в виде цветной диаграммы.

Кривые толщины – кривые, полученные по результатам расчета толщины.

С некоторыми компонентами можно совершать определенный набор действий с помощью мыши и команд меню.

Движение курсора мыши по колонке данных и толщины в строке состояния внизу рабочей области отражает значение глубины в точке под курсором, название кривой, на которой находится курсор, а также значения кривой или толщины, соответствующие глубине.

В основном меню можно менять интерактивно масштаб по оси значений с помощью мыши. При нажатии правой кнопки мыши на колонке данных появляется общее контекстное меню. При нажатии правой кнопки мыши на колонке толщины появляется контекстное меню толщины.

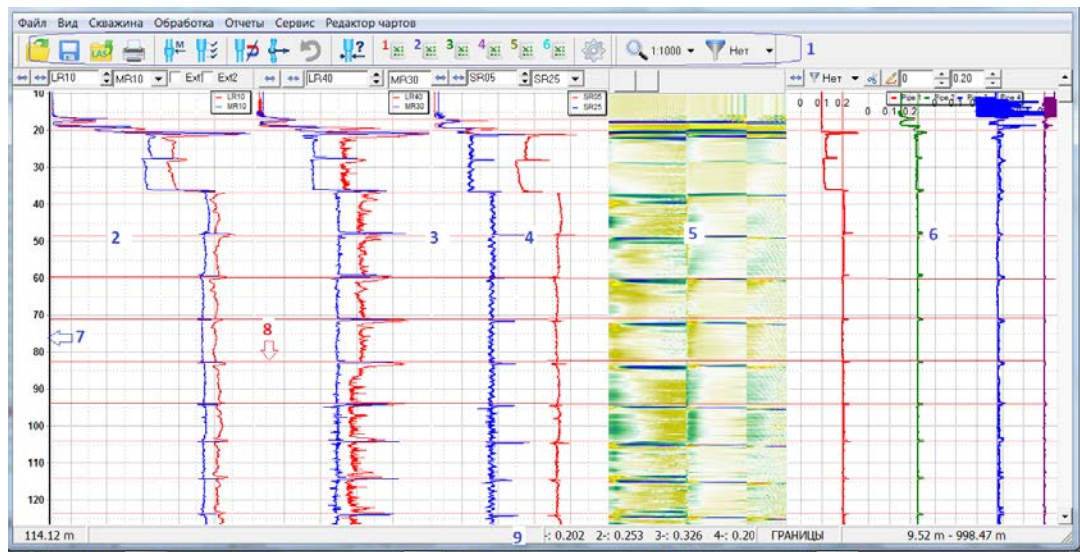


Рисунок 3.9 – Окно главного меню программы

В колонках спектра отображаются спектры интегральных зондов. Вид спектра задается командами меню, выбирается из всплывающего меню колонки спектра.

Спектр дефектограммы

$$D = \frac{Y(z, t) - \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} \varepsilon(z, t) dz}{\frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} \varepsilon(z, t) dz},$$

где z_1 – координата кровли, z_2 – координата подошвы.

Спектр дифференциала по глубине дефектограммы

$$Dif = \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon(z).$$

Спектр, нормализованный между муфтами,

$$VDLc = \frac{Y(z, t) - \frac{1}{\varepsilon - a} \int_a^{\varepsilon} \varepsilon(z, t) dz}{\frac{1}{\varepsilon - a} \int_a^{\varepsilon} \varepsilon(z, t) dz},$$

где a и ε – координаты муфт колонн.

Спектр, нормализованный по интервалам,

$$VDLi = Y(z, t) - \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} \varepsilon(z, t) dt}{z_{i+1} - z_i},$$

где z_i – границы изменений конструкции скважины.

Для интерпретации результатов необходимо выделить границы изменения конструкции скважины и положение муфт колонн. Границы конструкции и муфты (курсоры) отображаются на рабочей области в виде тонких горизонтальных полос. Границы конструкций задаются интерактивно по результатам измерений, муфты первой колонны определяются автоматически на основе алгоритма взаимной корреляции, муфты второй-шестой колонн задаются в интерактивном режиме.

3.2.3 Методика интерпретации

Алгоритм интерпретации включает следующие основные функции:

1. Увязка кривых спада по данным ГИС.
2. Построение конструкции скважины по кривым спада и сопоставление с данными паспорта скважины.
3. Уточнение параметров колонн на основе базы знаний.
4. Учёт эксцентриситета колонн.
5. Расчет толщины стенки первых двух колонн на основе базы данных для трёхколонной модели. Параметры третьей колонны постоянные, заданы по паспорту скважины.
6. Расчёт толщины третьей и четвертой колонн на основе базы данных для пятиколонной модели. Параметры пятой колонны заданы по паспорту скважины.

ны, параметры первых двух колонн – по результатам расчёта для трехколонной модели.

7. Вычисление толщины пятой колонны на основе базы знаний. В качестве входных данных используются результаты расчёта четырёх колонн.
8. Определение дефектов колонн и интервалов коррозии с использованием базы знаний.
9. Формирование таблиц, заключения, планшетов.

Интерпретация данных каротажа проводится последовательно: оценка качества измерений, фильтрация шумов, увязка по глубине, учёт эксцентриситета, уточнение конструкции скважины, учёт магнитного шума, определение положения муфт. Затем вводятся параметры колонн и рассчитываются толщины обсадных колонн.

Критерием оптимального решения является минимальное расхождение смоделированных и фактических КС. Для оценки дефектов колонн и их классификации используются элементы искусственного интеллекта, которые представляют результаты интерпретации предыдущих скважин в виде образов дефектов и кривых спада, зарегистрированных в скважинах и подтвержденных дополнительными исследованиями нарушений.

Привязка кривых по глубине

Для привязки кривых МИД-4 по глубине необходимо загрузить дополнительные кривые ГИС (обычно локатор муфт и ГК открытого ствола). Если нет данных ГИС, то можно привязать данные МИД-4 к конструкции скважины.

При выполнении загрузки дополнительных методов сначала открывается стандартный диалог выбора файлов, затем окно выбора кривых.

В левой части окна находится поле кривых. В нём красным цветом выдаётся кривая, которую нужно увязать, синим цветом выдаётся опорная кривая, одна из загруженных на предыдущем шаге дополнительных кривых.

Учёт эксцентриситета труб между муфтами

Известны случаи, когда трубы первой колонны вследствие нарушений технологии крепления имеют характерный прогиб между муфтами. Это ведет к уменьшению толщины цементного кольца и сокращению расстояния между первой и второй колоннами обсадных труб. На графиках это выражается в виде прогиба кривой между муфтами в сторону пиков муфт.

В программе предусмотрена возможность учитывать влияние эксцентриситета на основе метода преобразования Фурье.

Расчёт толщины

Для расчёта толщины вначале следует задать границы конструкций и параметры конструкции для выделенных интервалов.

Определение границ конструкции. Определение муфт

Для проведения дальнейшей интерпретации необходимо ввести в программу информацию о конструкции скважины. Это делается в 2 этапа. На первом этапе задаются границы колонн, диаметры и номинальные толщины труб, на втором определяются муфты каждой колонны.

Ввод данных на каждом из этапов можно выполнить двумя способами – интерактивно, отмечая глубины элементов конструкции на кривых, и вводом числовых значений из таблицы.

Интерактивный ввод

Для указания границ конструкций в меню «Скважина» выбираем режим «Границы», подводим указатель мыши на глубину, соответствующую границе конструкции, и дважды нажимаем на левую кнопку мыши. На рабочей области появится курсор границы конструкции. Удаление курсора выполняется двойным кликом на нём. Для передвижения курсора по глубине нужно навести указатель мыши на курсор и нажать левую кнопку мыши. Затем, не отпуская кнопки, нужно двигать курсор по вертикали до требуемой глубины, а потом отпустить кнопку мыши.

Наличие колонны определяется переключателем в соответствующем поле Колонна 1, ..., Колонна 6. Заданные параметры с первой по пятую колонну участвуют в расчёте толщины. Значение диаметров колонн можно задавать вручную вводом числа в соответствующем поле или выбрать стандартное значение из контекстного меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши в соответствующем поле ввода.

Для ввода параметров скважины в числовом виде в окне «Параметры колонн» надо нажать кнопку «Таблица». Откроется окно Wellsketch.

На рисунке 3.10 приведен пример технологии интерпретации многоколонной скважины, в конструкцию которой входит: НКТ диаметром $4\frac{1}{2}$ " (1); обсадная первая колонна диаметром 7" (2), которая начинается с глубины 2454 ft; вторая обсадная колонна – $9\frac{3}{4}$ " (3); третья обсадная колонна диаметром $13\frac{5}{8}$ " (4); обсадная колонна диаметром 20" (5). На глубине 220 ft обнаружено сквозное нарушение в трубах 20" и сильная коррозия в трубе $13\frac{5}{8}$ ". На рисунке приведены кривые спада ближнего, среднего и глубинного зондов для номинальной толщины труб (зелёная КС) и в интервале дефекта (красная КС). Опорные граничные величины начала переходного процесса в определенной трубе выбираются из базы знаний (БЗ) программного обеспечения или по КС для соответствующей модели из БЗ.

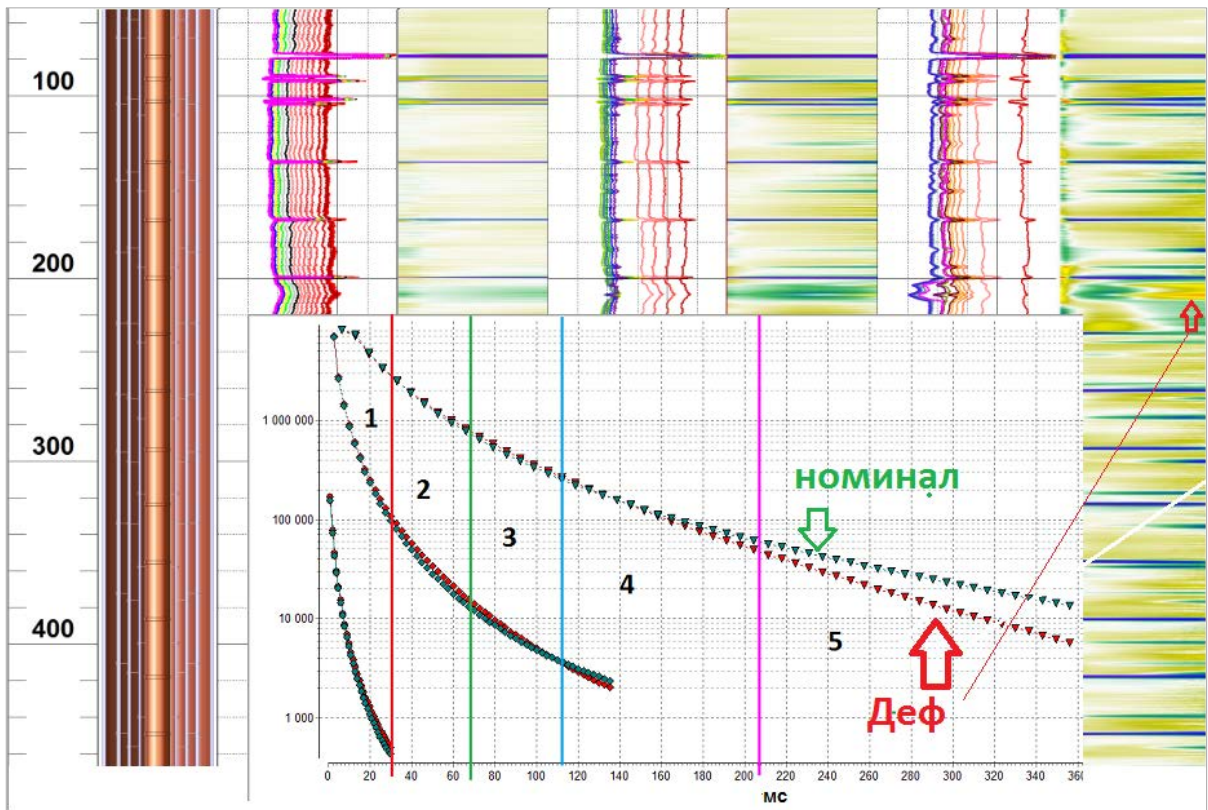


Рисунок 3.10 – Пример исследования многоколонной скважины

Выводы по главе 3

-Алгоритм вычисления толщины включает базу данных на основе математического моделирования, рассчитанной для различных моделей скважин, и метод итерационного поиска параметров труб колонны.

-Программное обеспечение интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии позволяет проводить предварительную обработку данных, оценку качества диаграмм, формировать модель скважины и заключение.

-Методика интерпретации включает алгоритм вычисления толщины, определение интервалов локальной коррозии по реперным интервалам на кривых спада и базу знаний, сформированную по результатам предыдущих исследований.

-Проведено тестирование ПО UniMid, DeViz-SM5 на математических и физических моделях, доказано, что итерационный процесс позволяет с заданной точностью определять параметры колонн.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ

Методика интерпретации многоколонных скважин в настоящее время внедряется в организации ПАО «Газпром».

4.1 Пример оценки технического состояния скважины до и после подъема подвесных колонн

Исследования проводились прибором МИД-4 в 3 этапа: 1 – до подъема НКТ (в интервале кондуктора пять колонн); 2 – после подъема НКТ $\varnothing 114$ мм (в интервале кондуктора четыре колонны); 3 – после подъема НКТ $\varnothing 178$ мм (в интервале кондуктора три колонны). Такой подход позволил оценить степень влияния НКТ на результаты интерпретации данных, полученных в четырёх- и пятиколонных интервалах.

Первый этап

В таблице 4.1 приведена конструкция скважины.

Таблица 4.1. Заявленная конструкция скважины. Этап 1

Колонны	Условный диаметр колонны, мм	Марка стали	Толщина стенки, мм	Интервал спуска колонны, м	Подъем цемента за колонной, м
Кондуктор	426	Д	11.00	498.8	до устья
Техническая колонна	324	Д	11.0	1151.3	до устья
Эксплуатационная колонна	245	P110	11.9	1355.4	до устья
Подвесная колонна	178	N-80Q	9.19	1 389.56	-
Подвесная колонна	114	К	7	1 400.28	-

На рисунке 4.1 приведён пример входа прибора в пятиколонную конструкцию, диаметр пятой колонны 426 мм, общая толщина колонн 50,1 мм. Короткий зонд на временном интервале до 140 мс (кривые S10 – S35 на 10–35 временных задержках) башмак кондуктора не отмечает, а на длинном зонде на временах регистрации ПП больше 240 мс (кривые SL20 – SL50) амплитуды с увеличением времени растут, башмак отмечается.

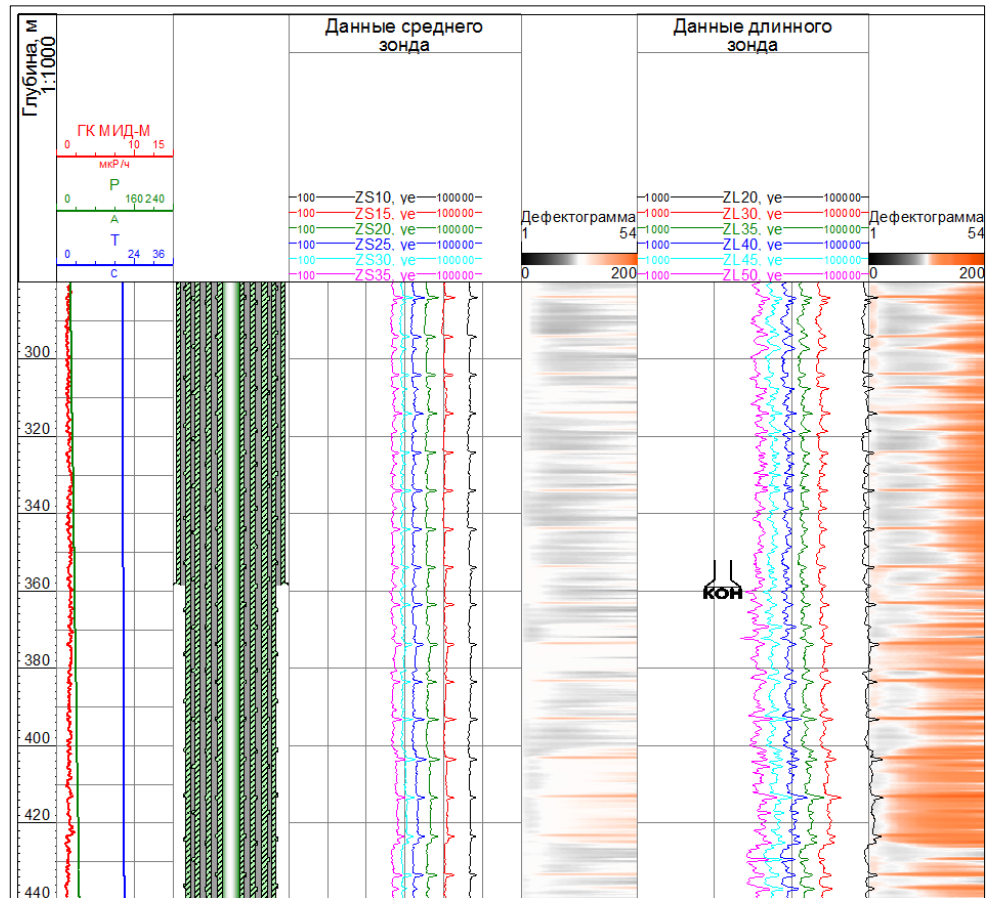


Рисунок 4.1 – Вход в кондуктор

КС для пяти и четырёх колонн расходятся при $t > 250$ мс (рисунок 4.2).

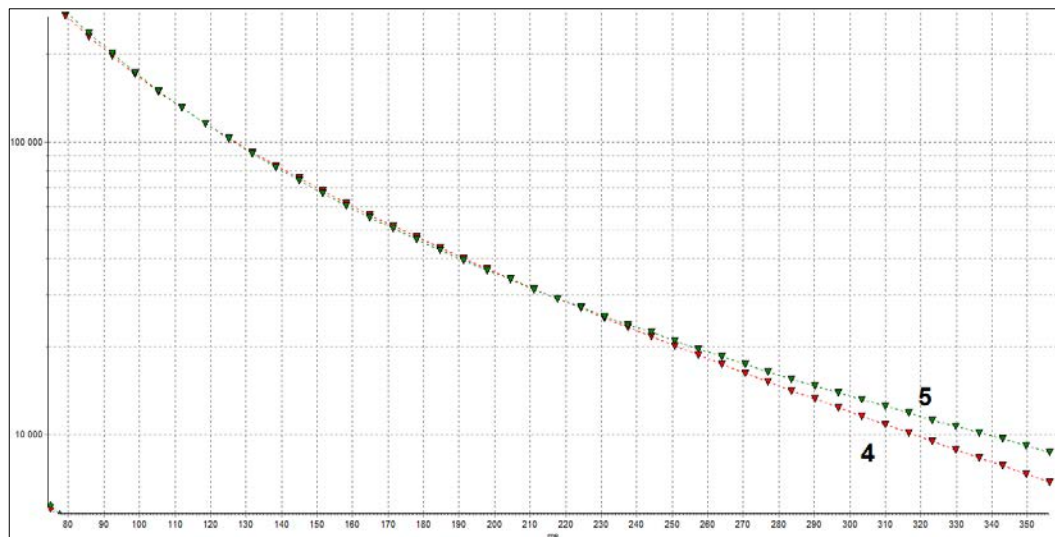


Рисунок 4.2 – Кривые спада для четырёх и пяти колонн.
Шифр кривых – число колонн

Пример входа прибора из трёхколонной конструкции в четырёхколонную приведён на рисунке 4.3. Средний зонд не позволяет создать вихревые токи в четвёртой колонне, на кривых ZS10 – ZS35 нет аномалий, длинный зонд позволяет навести вихревые токи в четвёртой колонне. КС для трёх и четырёх колонн расходятся при $t > 120$ мс для длинного зонда (рисунок 4.4). На рисунках 4.5, 4.6 приведены результаты измерений для трёхколонной модели. КС среднего зонда расходятся при $t > 60$ мс, для длинного зонда при $t > 80$ мс.

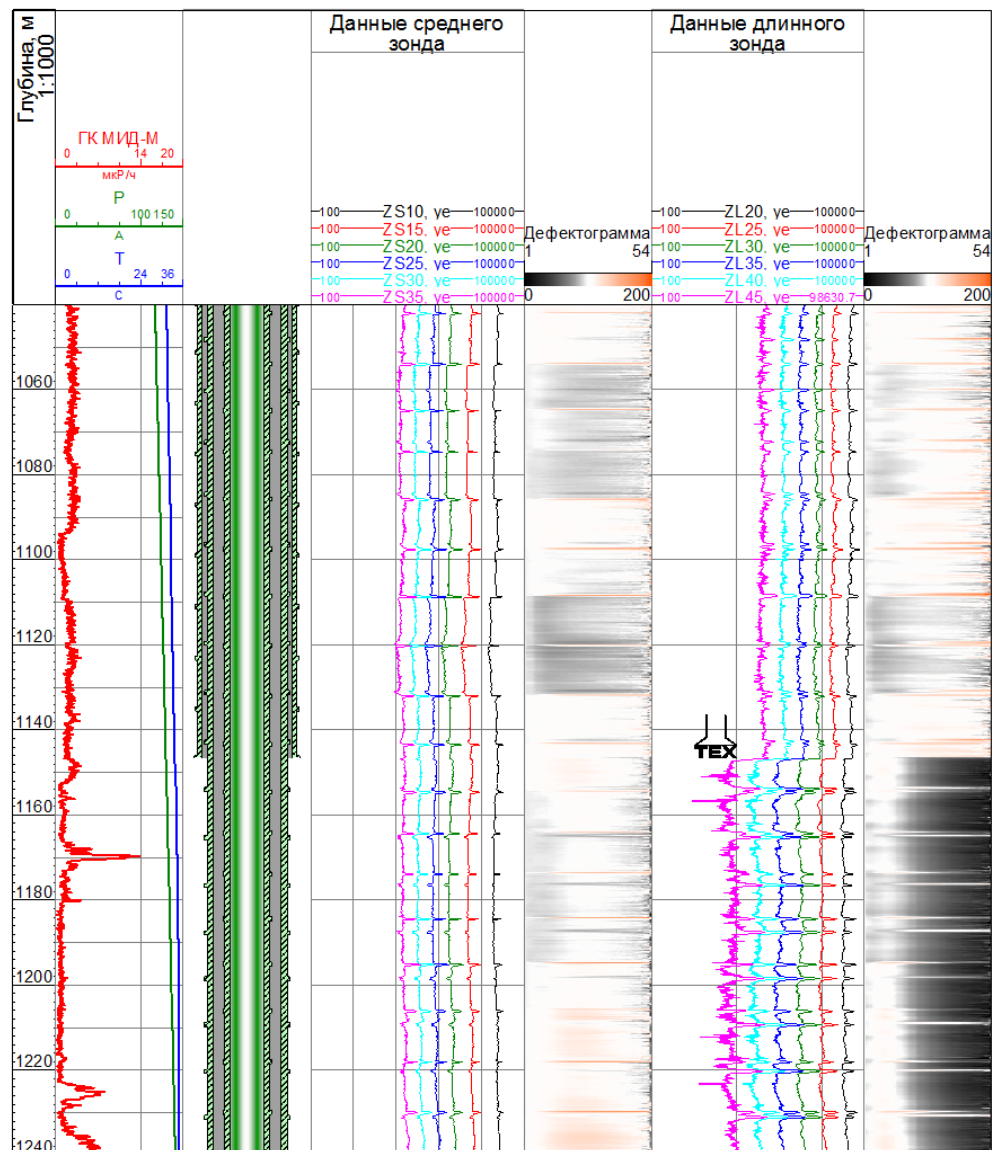


Рисунок 4.3 – Вход в техническую колонну

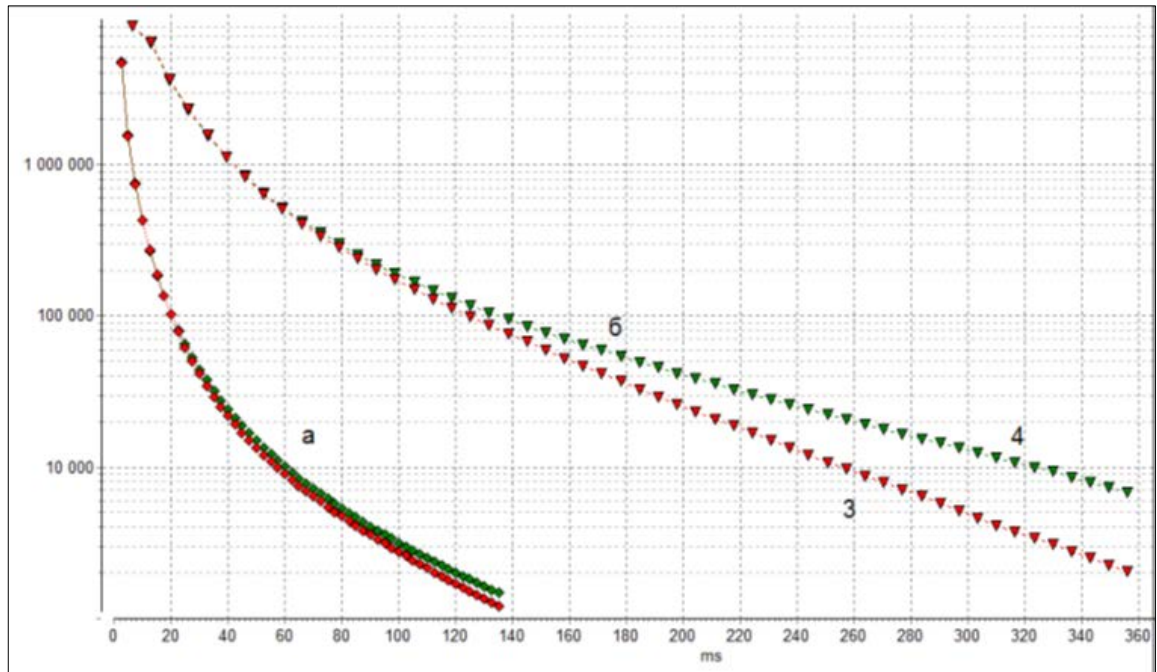


Рисунок 4.4 – Кривые спада для трех и четырех колонн: а – средний зонд, б – длинный зонд.
Шифр кривых – число колонн

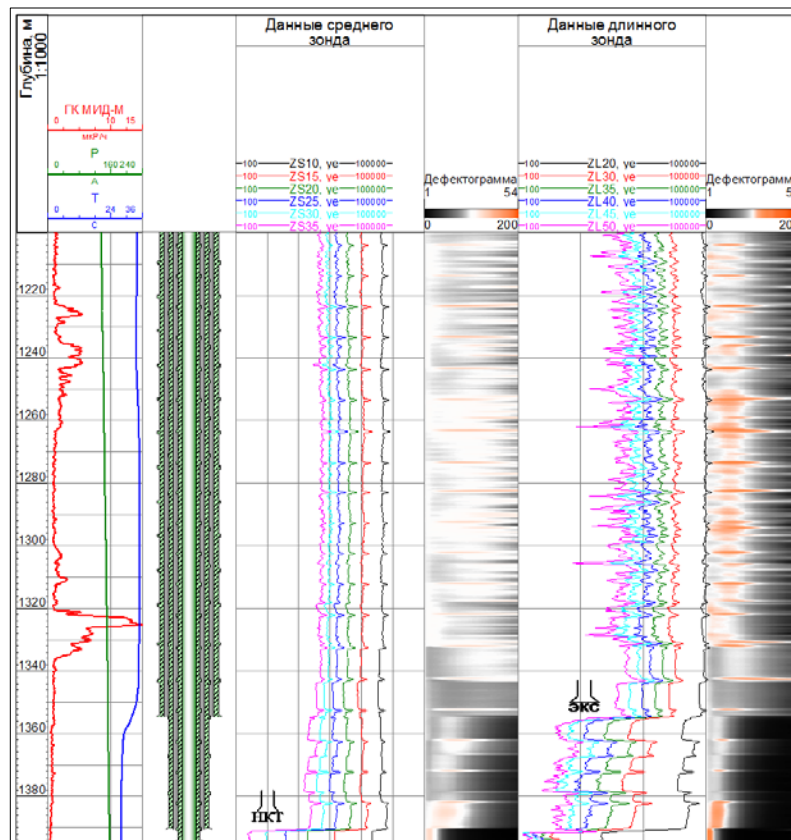


Рисунок 4.5 – Вход в эксплуатационную колонну

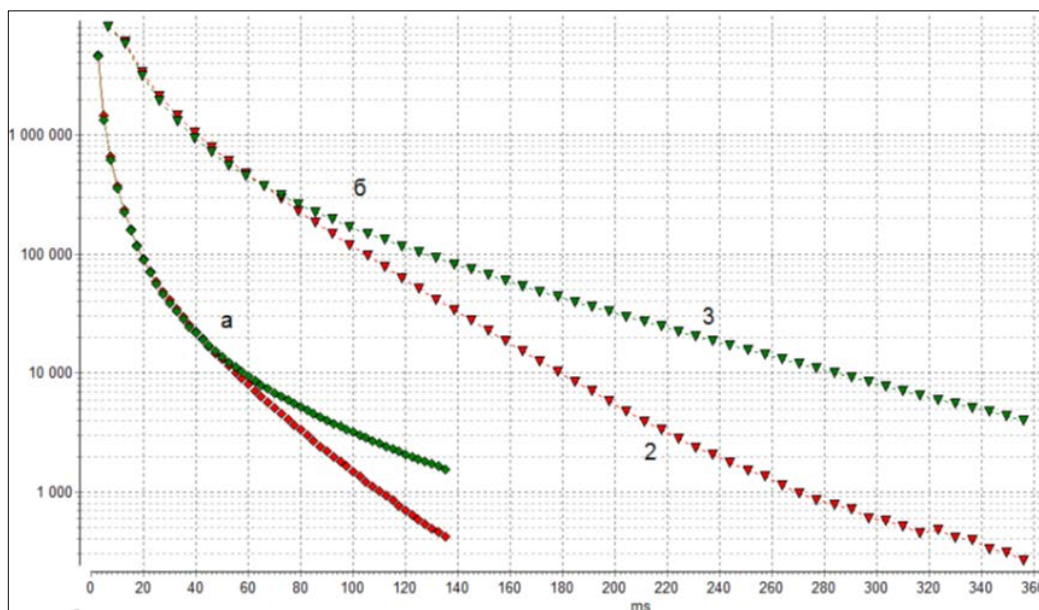


Рисунок 4.6 – Кривые спада для двух и трёх колонн.
Шифр кривых – число колонн

Второй этап

Исследование в четырёхколонной скважинной конструкции после подъёма подвесной колонны 114 мм.

На рисунке 4.7 представлены результаты измерений при входе прибора в кондуктор (четвёртая колонна). Увеличение амплитуд длинного зонда на кривых ZL42 – ZL50, для короткого зонда аномалий на кривых при переходе от трёх- в четырёхколонную конструкцию нет (SL10 – SL3), кривые спада расходятся при $t > 180$ мс (рисунок 4.8).

На рисунке 4.9 приведены результаты измерений при входе прибора в три колонны, КС среднего зонда расходятся при $t > 90$ мс, для длинного зонда при $t > 100$ мс (рисунок 4.10).

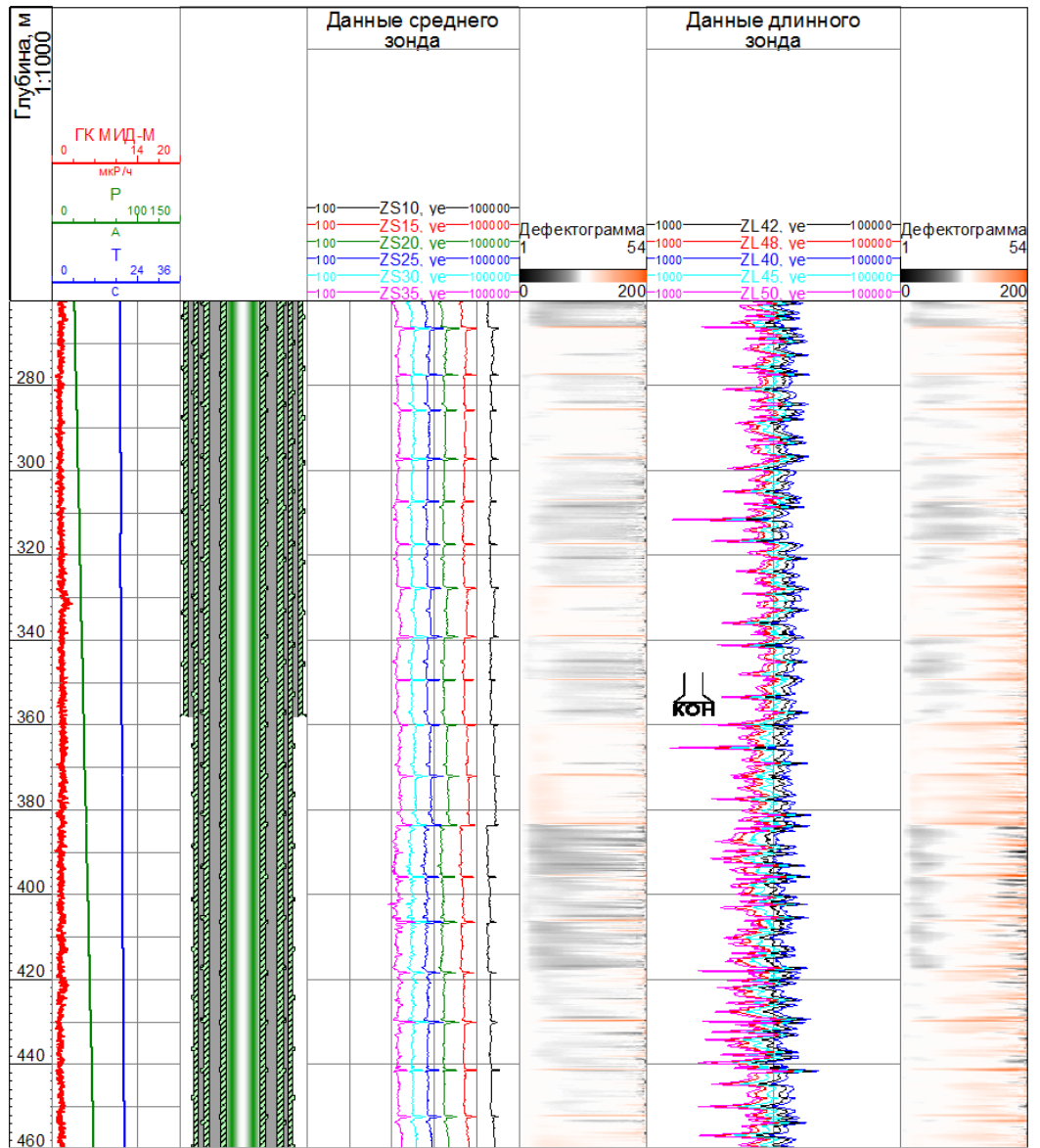


Рисунок 4.7 – Вход в кондуктор (D=426 мм)

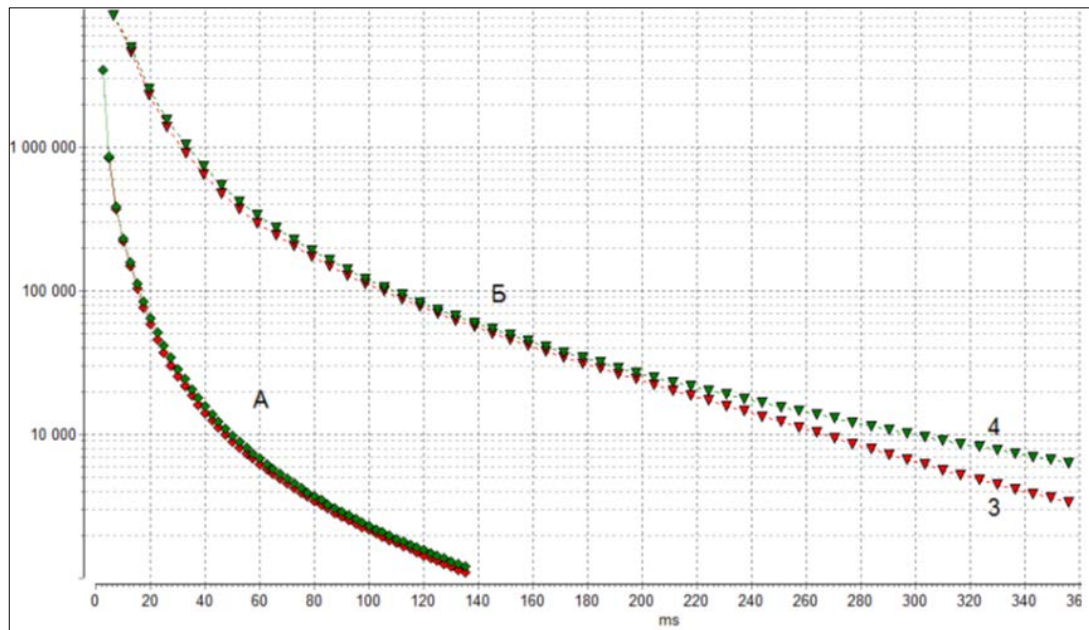


Рисунок 4.8 – Кривые спада для трёх и четырёх колонн ($D=426$ мм).
Шифр кривых число колонн

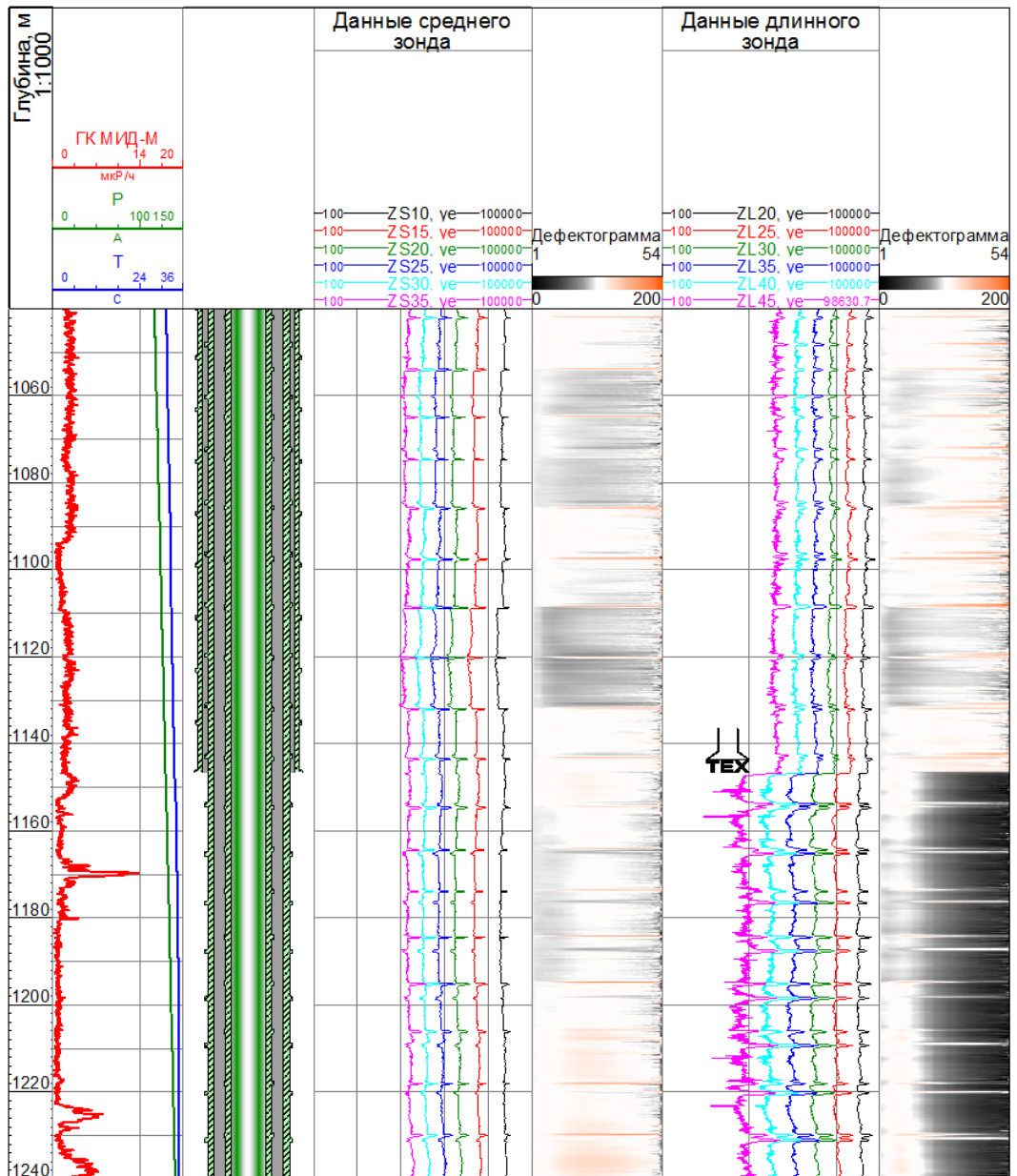


Рисунок 4.9 – Вход в три колонны (D=324 мм)

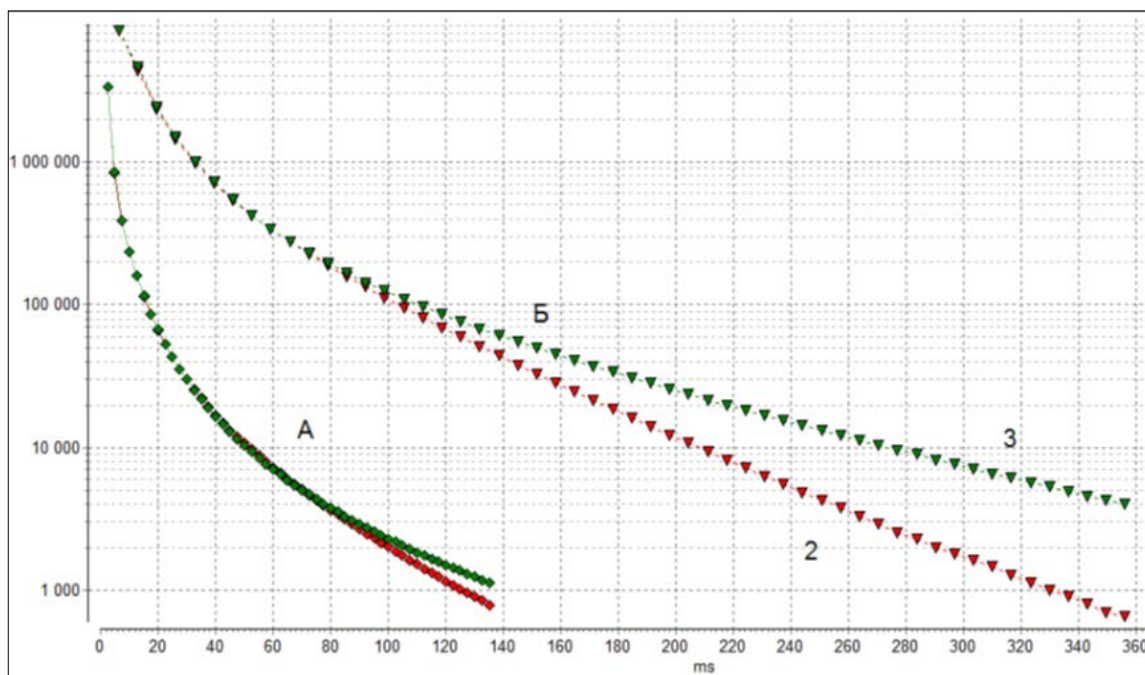


Рисунок 4.10 – Кривые спада для двух и трех колонн ($D=324$ мм).
Шифр кривых – число колонн

Третий этап

Исследования в трёхколонной скважинной конструкции.

На рисунке 4.11 приведены результаты измерений при входе прибора в три колонны, КС среднего зонда расходятся при $t > 90$ мс, длинного зонда – при $t > 125$ мс (рисунок 4.12).

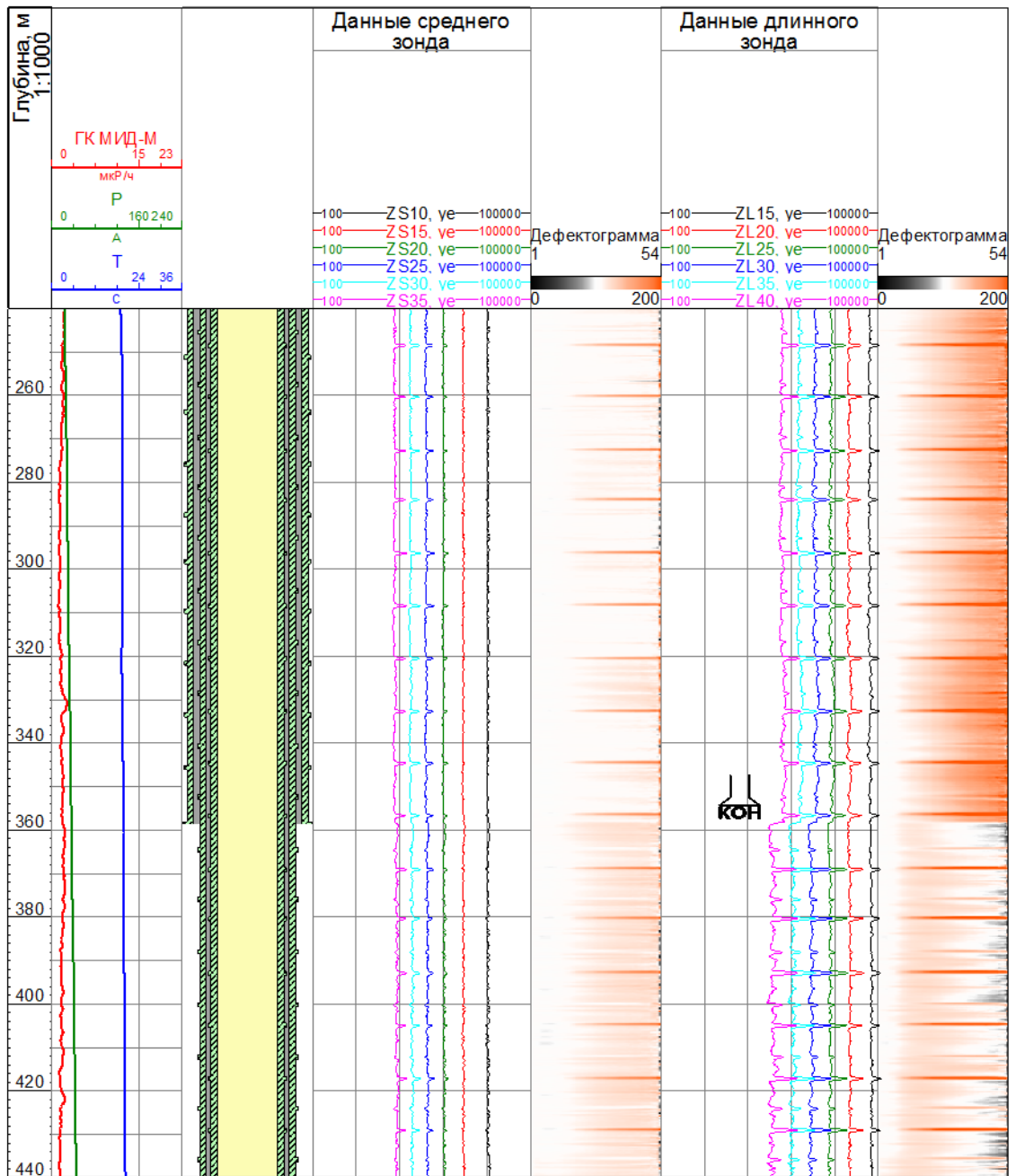


Рисунок 4.11 – Вход в кондуктор (третья колонна)

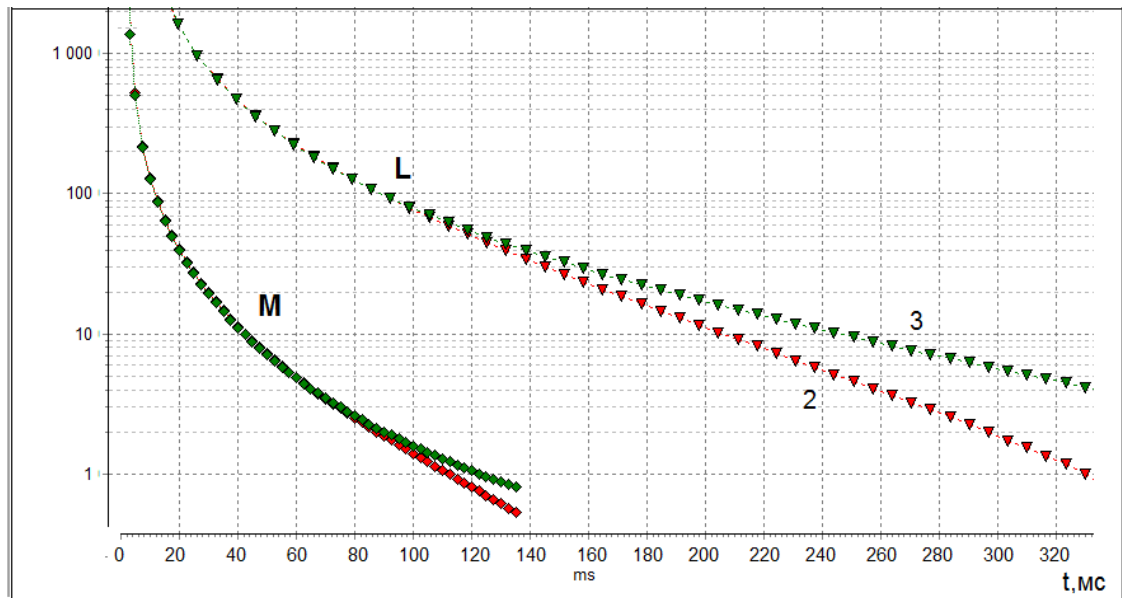


Рисунок 4.12 – Кривые спада для двух и трёх колонн ($D=426$ мм).
Шифр кривых – число колонн

В таблице 4.2 приведены результаты расчётов толщины стенки колонны ТК $\varnothing 324$ мм для условий, когда она является четвертой, третьей и второй. Разница средней толщины в интервале одной трубы не превышает 0,4 мм.

Таблица 4.2. Сопоставление результатов расчёта толщины ТК $\varnothing 324$ мм

№ п/п	Верх трубы, м	Низ трубы, м	Длина трубы, м	Толщина		
				1-й этап, м	2-й этап, м	3-й этап, м
1	2.3	10.7	8.3	10.76	10.55	10.27
2	10.7	22.6	11.9	10.85	10.59	10.59
3	22.6	36.1	13.6	10.90	10.50	10.45
4	36.1	46.6	10.5	10.98	10.66	10.53
5	46.6	60.4	13.8	10.90	10.55	10.56
6	60.4	71	10.5	10.75	10.78	10.78
7	71	83	12	10.99	10.76	10.67
8	83	94.5	11.6	10.96	10.87	10.82
9	94.5	104	9.5	10.94	10.82	10.81
10	104	115.8	11.8	11.02	10.88	10.64
11	115.8	127.3	11.5	10.82	10.74	10.59
12	127.3	139.1	11.8	11.03	11.00	11.01
13	139.1	151	11.9	11.03	10.83	10.61
14	151	162.8	11.9	11.03	10.86	10.73
15	162.8	175.1	12.3	10.88	10.86	10.81

16	175.1	187	11.9	11.08	10.96	10.91
17	187	199	12	11.06	10.96	10.92
18	199	210.4	11.4	11.08	10.94	10.77
19	210.4	221.7	11.3	11.03	10.93	10.86
20	221.7	233.7	12	10.96	10.67	10.67
21	233.7	245.4	11.7	11.04	11.03	10.92
22	245.4	257.5	12.1	10.92	10.84	10.64
23	257.5	269.6	12.1	11.06	10.92	10.98
24	269.6	281.1	11.5	10.97	10.77	10.78
25	281.1	292.9	11.8	11.08	10.84	10.88
26	292.9	305	12.1	10.92	10.74	10.74
27	305	316.8	11.8	10.91	10.66	10.60
28	316.8	328.7	11.8	11.20	10.93	10.68
29	328.7	340.6	11.9	11.05	10.67	10.60
30	340.6	352.5	11.9	11.04	10.83	10.60
31	352.5	364.5	12.1	11.00	10.69	10.44
32	364.5	376.1	11.5	11.04	10.89	10.83
33	376.1	388.1	12	11.14	10.98	10.77
34	388.1	400.2	12.2	11.22	11.02	10.73
35	400.2	412.3	12.1	11.10	11.02	10.82
36	412.3	424.1	11.8	11.28	10.79	10.38
37	424.1	435.9	11.8	11.11	10.84	10.59
38	435.9	447.6	11.7	11.12	10.68	10.29
39	447.6	459.2	11.6	10.95	10.78	10.48
40	459.2	471	11.8	11.05	10.81	10.48
41	471	483.2	12.2	11.06	10.85	10.55
42	483.2	494.9	11.7	11.02	10.91	10.77
43	494.9	506.6	11.7	11.12	10.81	10.69
44	506.6	518.6	12	11.13	11.03	10.87
45	518.6	530.5	11.9	11.20	11.07	10.92
46	530.5	542.4	11.9	11.21	11.01	10.84
47	542.4	554.3	11.9	11.19	11.05	11.02
48	554.3	566.4	12.1	11.00	10.87	10.72
49	566.4	578.4	12	10.86	10.91	10.76
50	578.4	590.5	12.1	10.78	10.89	10.70
51	590.5	602.5	12	11.13	11.09	11.04
52	602.5	614.5	12	11.06	11.01	10.95
53	614.5	626	11.5	11.15	10.86	10.85
54	626	637.7	11.7	11.04	10.89	10.78
55	637.7	649.3	11.6	11.18	10.96	10.86
56	649.3	661	11.7	11.04	10.96	10.84

57	661	673.1	12	10.91	10.98	10.87
58	673.1	684.9	11.9	10.81	10.91	10.77
59	684.9	696.4	11.5	10.98	10.94	10.75
60	696.4	708.3	11.9	11.08	10.86	10.59
61	708.3	720.6	12.3	10.87	10.88	10.58
62	720.6	732.5	11.9	11.00	11.04	10.88
63	732.5	744.5	12	10.96	10.91	10.72
64	744.5	756.1	11.7	11.02	10.90	10.83
65	756.1	768.2	12	11.01	10.75	10.49
66	768.2	780.3	12.2	10.96	10.65	10.47
67	780.3	792.3	12	10.89	10.80	10.60
68	792.3	804.1	11.8	10.98	10.86	10.76
69	804.1	815.6	11.5	10.97	11.01	10.93
70	815.6	827.7	12	10.98	10.87	10.81
71	827.7	839.6	12	10.98	10.90	10.92
72	839.6	851.3	11.6	11.00	10.95	10.88
73	851.3	863.1	11.9	10.90	10.98	10.85
74	863.1	875	11.9	10.88	10.89	10.57
75	875	886.9	11.9	10.91	10.74	10.52
76	886.9	899	12.1	11.05	10.86	10.77
77	899	911.1	12.2	11.05	10.62	10.47
78	911.1	922.6	11.5	10.82	10.65	10.48
79	922.6	934.7	12	10.76	10.71	10.45
80	934.7	946.4	11.7	10.63	10.64	10.46
81	946.4	957.3	10.9	10.71	10.59	10.38
82	957.3	969.2	11.9	10.96	10.75	10.48
83	969.2	981.2	12	10.73	10.71	10.47
84	981.2	993.1	11.9	10.95	10.83	10.65
85	993.1	1004.9	11.9	10.65	10.82	10.63
86	1004.9	1016.7	11.7	10.79	10.66	10.43
87	1016.7	1027.9	11.3	10.68	10.67	10.47
88	1027.9	1039.5	11.6	10.90	10.65	10.46
89	1039.5	1050.7	11.2	10.84	10.60	10.38
90	1050.7	1062.9	12.2	10.82	10.65	10.40
91	1062.9	1074.9	12	10.74	10.69	10.46
92	1074.9	1087	12.1	10.93	10.84	10.60
93	1087	1098.6	11.6	10.93	10.79	10.65
94	1098.6	1110.7	12.1	10.76	10.78	10.60
95	1110.7	1122.8	12.1	11.06	10.80	10.58
96	1122.8	1134.9	12.1	10.87	10.76	10.53
97	1134.9	1146.5	11.7	10.89	10.86	10.77

В таблице 4.3 приведены результаты вычисления толщины кондуктора диаметром 425 мм при условиях, когда он третья и четвёртая колонна.

Таблица 4.3. Сопоставление результатов расчета толщины кондуктора Ø426 мм

№	Верх трубы, м	Низ трубы, м	Длина трубы, м	Толщина	
				2-й этап, м	3-й этап, м
1	2.5	11.1	8.7	10.87	10.80
2	11.1	21	9.9	10.83	10.81
3	21	31.4	10.4	10.65	10.60
4	31.4	42.6	11.1	10.82	10.79
5	42.6	54.1	11.5	10.76	10.66
6	54.1	65.7	11.6	10.86	10.79
7	65.7	76.7	11	10.99	10.88
8	76.7	87.9	11.3	11.05	11.10
9	87.9	98.9	10.9	10.96	11.18
10	98.9	109.9	11	11.10	11.09
11	109.9	120.7	10.8	11.02	10.96
12	120.7	132.1	11.4	10.83	10.85
13	132.1	143.5	11.4	10.97	10.98
14	143.5	154.2	10.7	11.05	10.96
15	154.2	166.4	12.2	11.05	11.01
16	166.4	179.1	12.7	10.98	10.99
17	179.1	191.3	12.1	11.00	10.96
18	191.3	203.7	12.4	11.00	11.00
19	203.7	215.8	12.1	10.99	10.91
20	215.8	227.1	11.3	10.88	10.78
21	227.1	238.9	11.8	10.95	10.84
22	238.9	251.2	12.3	11.02	10.94
23	251.2	263.8	12.6	10.97	10.87
24	263.8	275.8	12	10.88	10.85
25	275.8	287.5	11.7	10.83	10.73
26	287.5	298.2	10.7	10.89	10.85
27	298.2	309.6	11.4	10.89	10.78
28	309.6	321.6	12	10.92	10.84
29	321.6	333.5	11.9	11.06	11.05
30	333.5	345.6	12.1	10.93	10.93
31	345.6	358.1	12.5	11.21	11.16

4.2 Примеры определения нарушений и толщины стенок колонн

Для оценки технического состояния обсадных колонн и колонны НКТ проведены измерения в многоколонной скважине аппаратурой МИД-СМ5. В таблице 4.4 дана конструкция скважины.

Таблица 4.4. Конструкция скважины

Колонны	Условный диаметр колонны, мм	Толщина стенки, мм	Интервал спуска колонны, м	Подъем цемента за колонной, м
Направление	630	12	20	до устья
Кондуктор	426	12	243.4	до устья
Техническая колонна	324	11	383	до устья
Техническая колонна	245	10	895	до устья
Эксплуатационная колонна	168	9	1 142.39	до устья
НКТ	114	7	1 076.29	до устья

Для контроля качества материала использовалась повторная запись. Среднее расхождение основной и повторной записей не более 0,1 %, максимальное расхождение не превышает 6 %.

На рисунок 4.13 приведены кривые длинного зонда LR на временах от 100 до 420 мс. На интервале 358.05–379.9 м обрыв четвертой колонны, и на глубине 420 м башмак в четвертой колонне Ø 324 мм.

КС среднего и длинного зондов приведены на рисунке 4.14. Обрыв колонны определяется на временах больше 180 мс – КС длинного зонда начинают расходиться. Обрыв подтверждается как по данным толщины четвертой колонны, так и по совпадению КС для трёхколонной модели в интервале обрыва четвертой колонны.

Интенсивной коррозии на всём интервале регистрации не обнаружено.

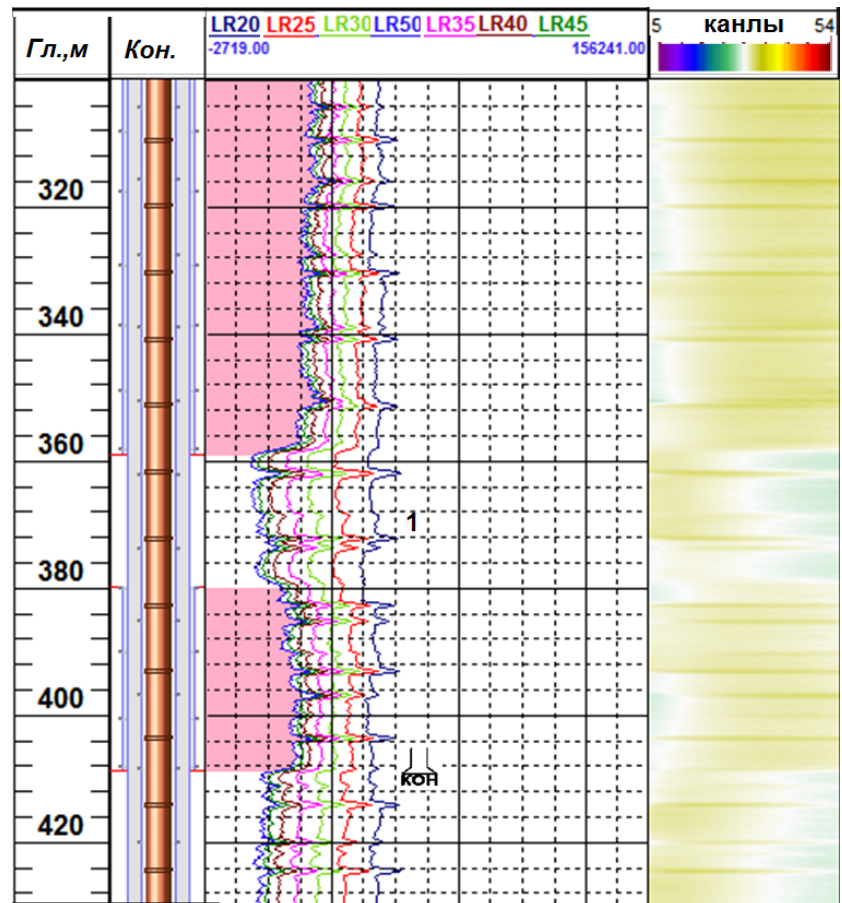


Рисунок 4.13 – Обрыв четвёртой колонны в интервале 359,05–379,9 м

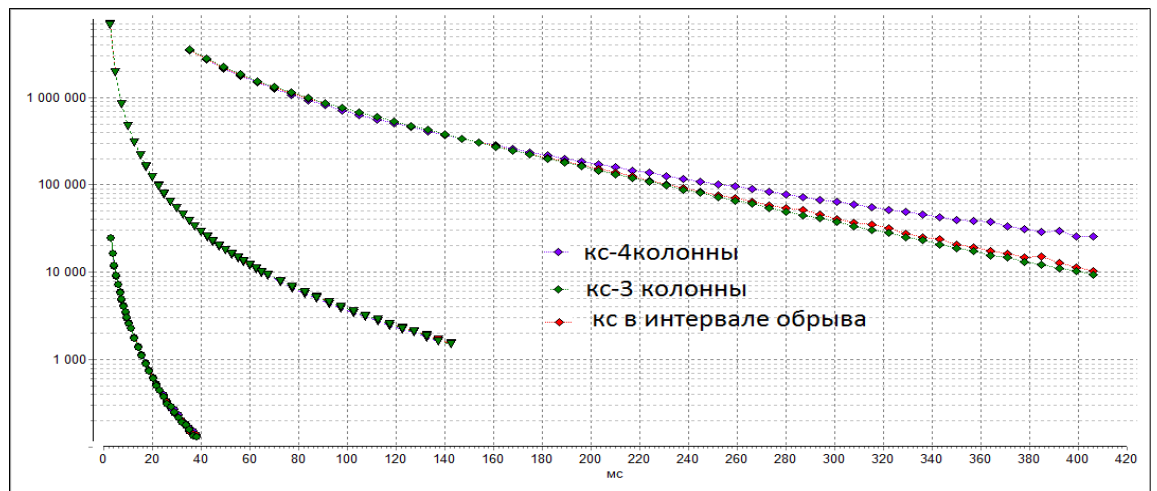


Рисунок 4.14 – Кривые спада в интервале четырёх колонн, трёх колонн, обрыва четвёртой колонны

Ниже приведены исследования аппаратурой МИД-СМ5 в пятиколонной скважине. Регистрация данных проведена в НКТ (в интервале от двух до шести

колонн) и в эксплуатационной колонне (в интервале одной колонны). Конструкция скважины приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Конструкция скважины

Колонны	Условный диаметр колонны, мм	Толщина стенки, мм	Интервал спуска колонны, м	Подъем цемента за колонной, м
Направление	630	12	24	до устья
Кондуктор	426	12	243.4	до устья
Техническая колонна	324	9.5	383	до устья
Техническая колонна	245	10	895	до устья
Эксплуатационная колонна	168	10.6	1 142.39	до устья
НКТ	114	7	1 079.8	до устья

В интервале 1094,3–1099 м, 1101,9–1105,7 м определено нарушение целостности эксплуатационной колоны через НКТ зондами большой и средней глубинности (рисунок 4.15). LR10, LR20 – показания интегрального зонда большой глубинности на десятом и двадцатом временном измерении.

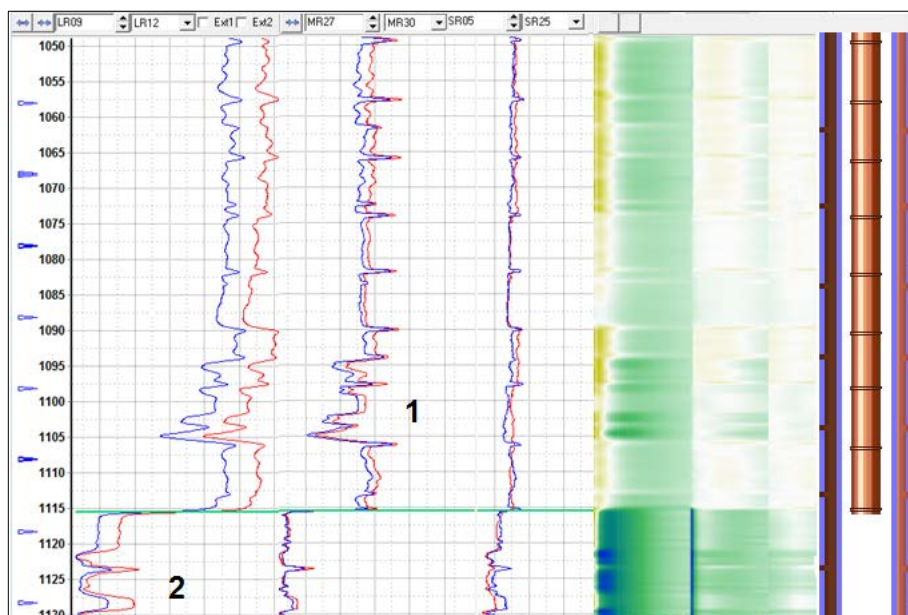


Рисунок 4.15 – Нарушение целостности ЭК Ø 245 мм через НКТ (интегральные зонды) и в интервале одной колонны

На рисунке 4.16 приведён пример исследования скважины с многоколонной конструкцией, которая включает: НКТ диаметром $4\frac{1}{2}'' \times 3\frac{1}{2}''$ (1), первую обсадную колонну диаметром 7'' (2), которая начинается с 2471ft, вторую обсадную колонну – $9\frac{5}{8}''$ (3), третью обсадную колонну диаметром $13\frac{3}{8}''$ (4), обсадную колонну диаметром 20'' (5). Проведён расчёт толщины (ТНК1, ТНК2, ТНК3, ТНК4) и потери металла (MLD) стенок труб четырёх колонн. В приустьевой зоне четвёртой колонны обнаружено сквозное нарушение в трубах диаметром 20'', $13\frac{3}{8}''$ и сильная коррозия в колонне $9\frac{5}{8}''$. На рисунке 4.17 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 трубы были извлечены на поверхность и результаты исследований подтвердились визуально.

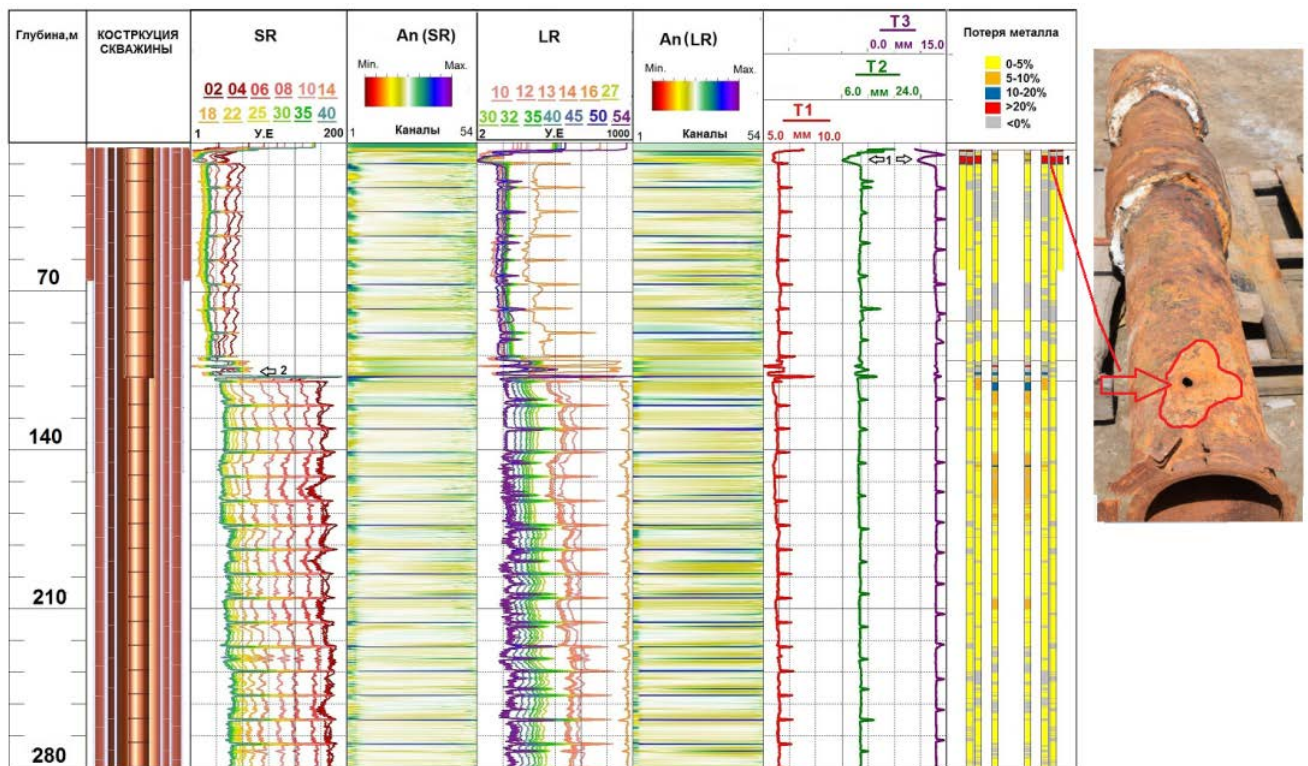


Рисунок 4.16 – Определение толщины стенки труб в четырёхколонной скважине в интервале нарушения в приустьевой зоне

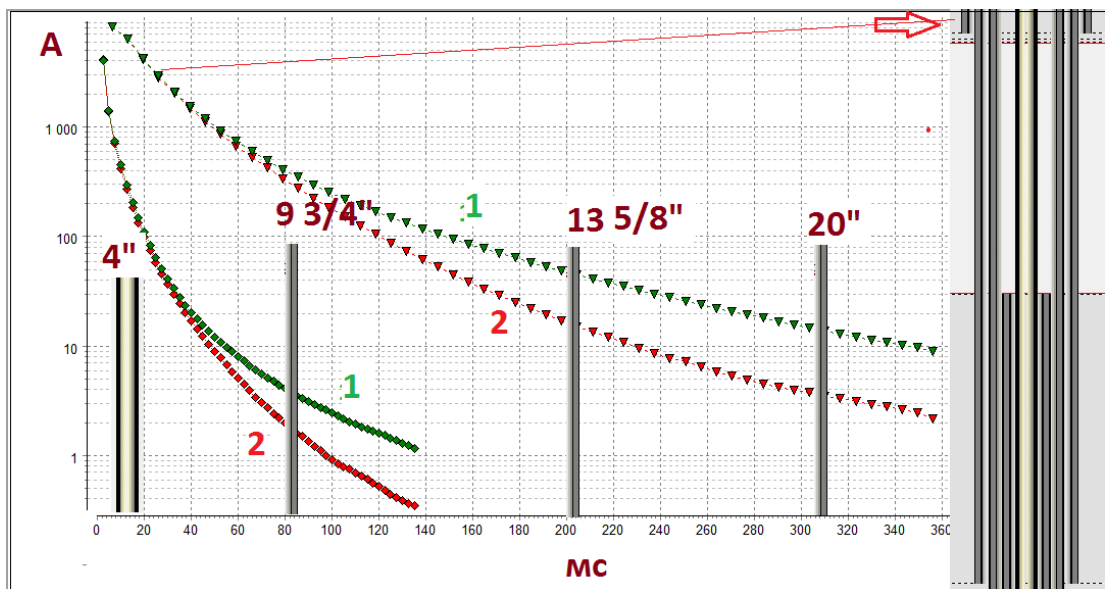


Рисунок 4.17 – Кривые спада в приустьевой зоне. 1 – для целых четырех труб, 2 – в интервале нарушения целостности труб 20", 13³/₈", 9⁵/₈"

На рисунке 4.18 представлены результаты интерпретации данных в пятиколонной скважине, которая включает: НКТ диаметром 2⁷/₈" (1), первую обсадную колонну диаметром 4" (2), вторую обсадную колонну диаметром 7" (3), третью обсадную колонну диаметром 9⁵/₈" (4), четвертую обсадную колонну диаметром 13³/₈" (5). Получены расчёты толщины стенки труб и потери металла пяти колонн. Определено сквозное нарушение в трубе 13³/₈" (5) и сильная коррозия в 9⁵/₈" (4), что подтверждается кривыми спада и граничными значениями времени ПП (1, 2, 3, 4, 5) для каждой колонны из базы знаний (БЗ).

В таблице 4.6 дана конструкция скважины, а на рисунке 4.19 приведён пример расчета толщины стенки в трёх колоннах, нарушения целостности в третьей колонне (ОК 9⁵/₈") и коррозии во второй колонне. При выявлении дефектов и подтверждении полученных расчётов были использованы данные из базы знаний.

Пример использования БЗ для подтверждения результатов определения толщины НКТ (tubing), обсадной колонны диаметром 7" (CSG7) и обсадной колонны 9⁵/₈" (CSG9⁵/₈) приведён на рисунке 4.20. Здесь 1 – КС из базы знаний для номинальных значений толщин колонн для трёхколонной модели, 2 – КС из базы

знаний для двухколонных интервалов, 4 – КС в интервале сильной коррозии третьей колонны толщиной стенки меньше 3 мм.

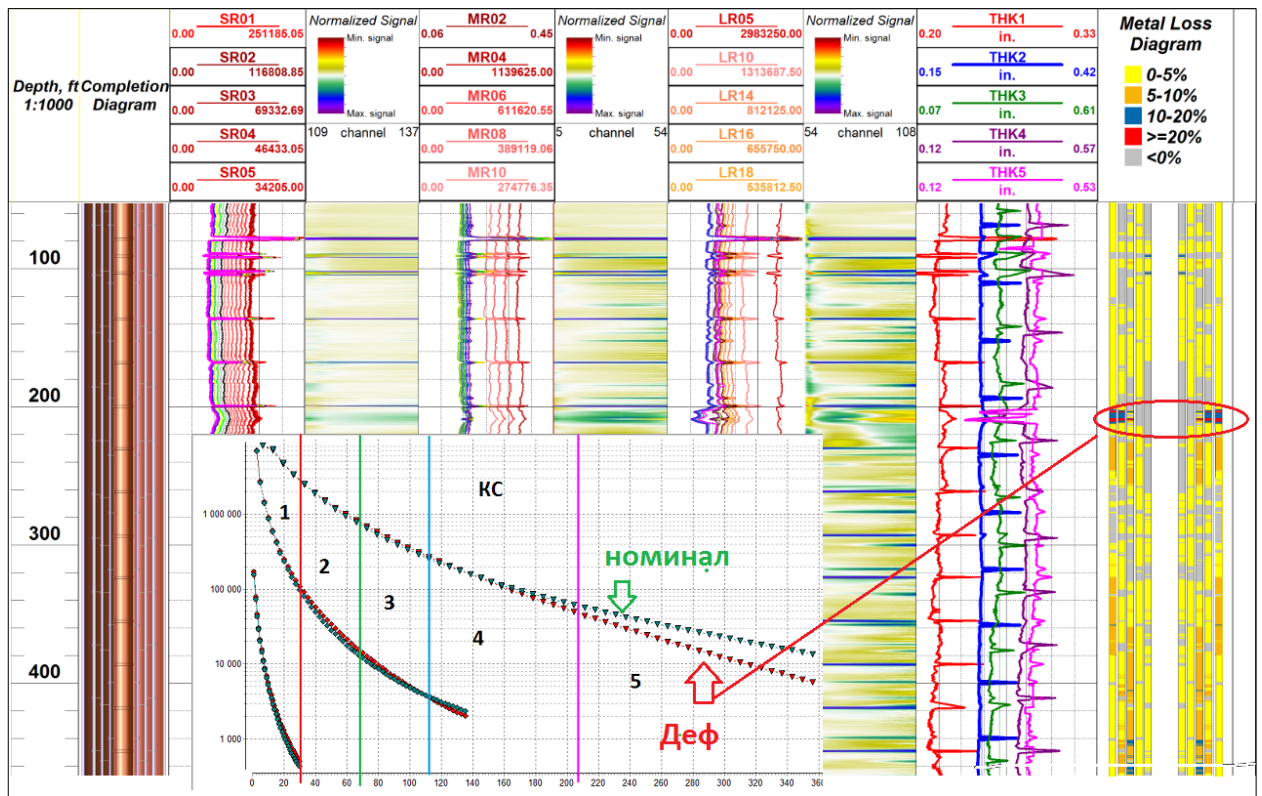


Рисунок 4.18 – Пример интерпретации в скважине пятиколонной конструкции

Таблица 4.6. Заявленная конструкция скважины

Колонны	Условный диаметр колонны, дюйм	Толщина стенки, дюйм	Начало колонны, фт	Конец колонны, фт
Обсадная колонна	13 ³ / ₈	0.38	Устье	2660
Обсадная колонна	9 ⁵ / ₈	0.395	Устье	5367
Обсадная колонна	7	0.317	Устье	7634
НКТ	4 ¹ / ₂	0.25	4542	7570



Рисунок 4.19 – Пример интерпретации в скважине пятиколонной конструкции

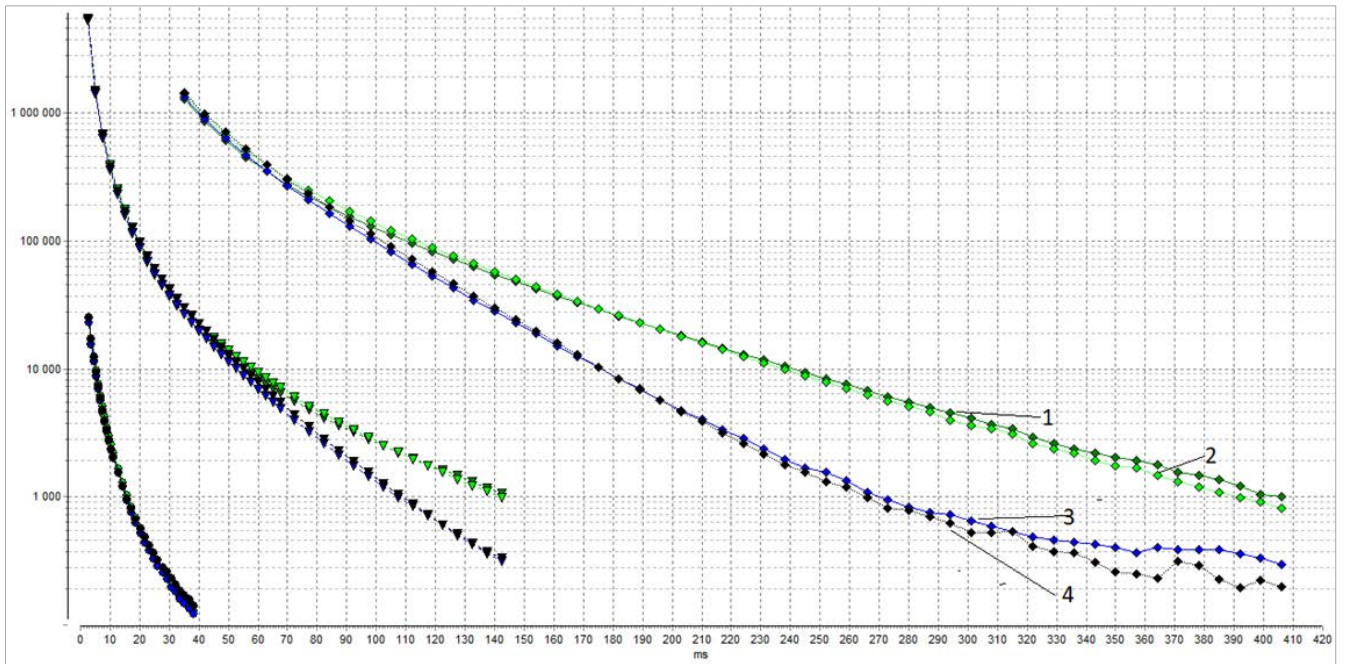


Рисунок 4.20 – Кривые спада из базы знаний: 1 – для целых трех труб ($4\frac{1}{2}''+7''+9\frac{5}{8}''$), 2 – КС из скважины в интервале целых трех труб, 3 – КС из базы знаний для целых двух труб ($4\frac{1}{2}''+7''$), 4 – КС из скважины в интервале нарушения целостности обсадной колонны $9\frac{5}{8}''$

В таблице 4.7 приведена конструкция следующей скважины, а на рисунке 4.21 представлены результаты исследования. На рисунке 4.22 представлено сопоставление кривых спада из базы знаний и КС исследуемой скважины.

Таблица 4.7. Заявленная конструкция скважины

Колонны	Условный диаметр колонны, дюйм	Толщина стенки, дюйм	Начало колонны, фт	Конец колонны, фт
Обсадная колонна	20	0.38	Устье	2660
Обсадная колонна	$13\frac{3}{8}$	0.38	Устье	2660
Обсадная колонна	$10\frac{3}{4}$	0.395	Устье	5367
Обсадная колонна	$7\frac{5}{8}$	0.317	Устье	7634
Обсадная колонна	$5\frac{1}{2}$	0.25	4542	7570

В данной скважине было проведено исследование от устья до забоя и определена толщина четырех колонн труб. В приустьевой зоне обнаружено нарушение целостности 4-й колонны и коррозия в 3-й колонне. Достоверность полученных результатов подтверждена КС из базы знаний для заданной конструкции.

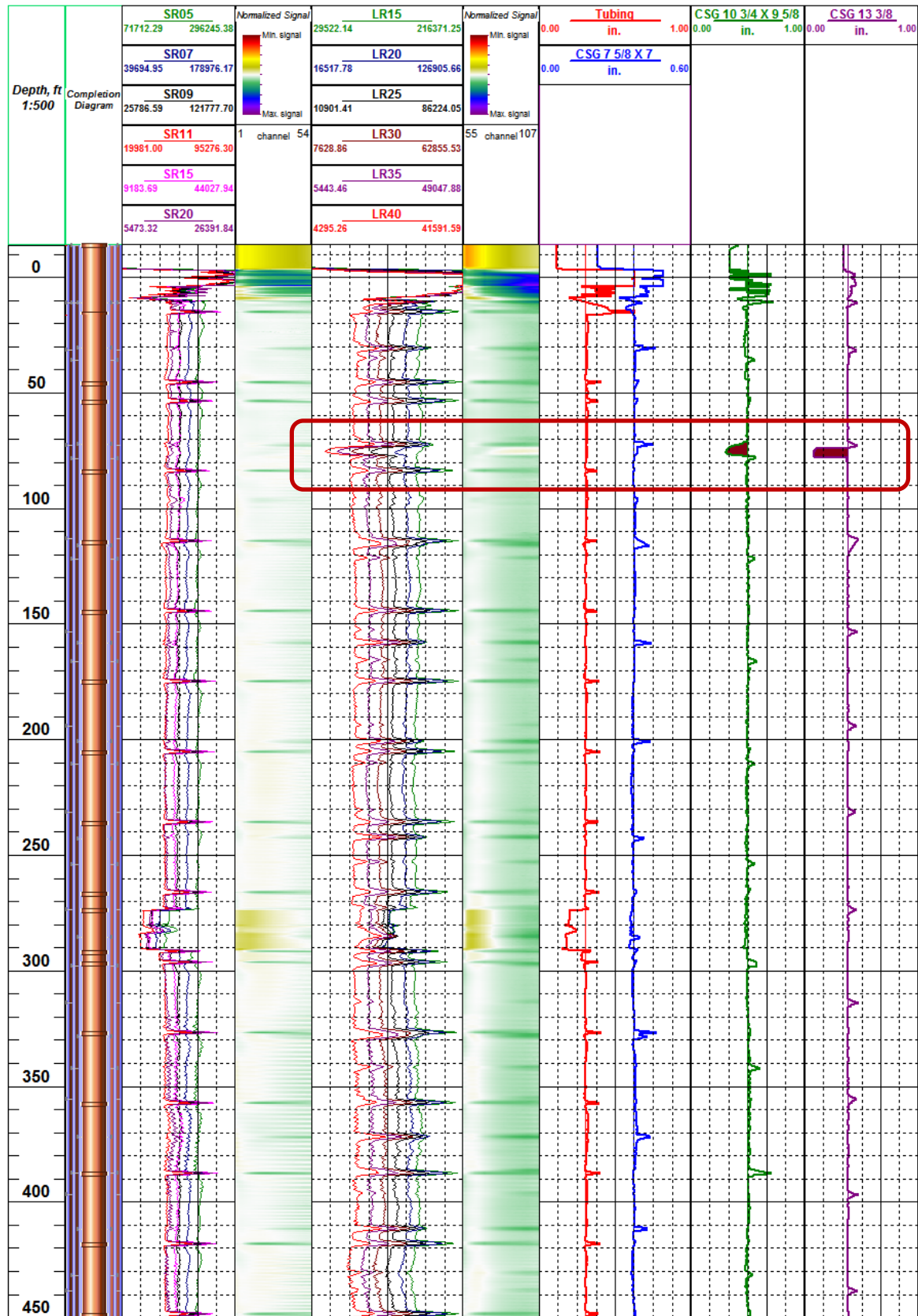


Рисунок 4.21 – Пример определения нарушения целостности в 4-й колонне и коррозии в 3-й колонне

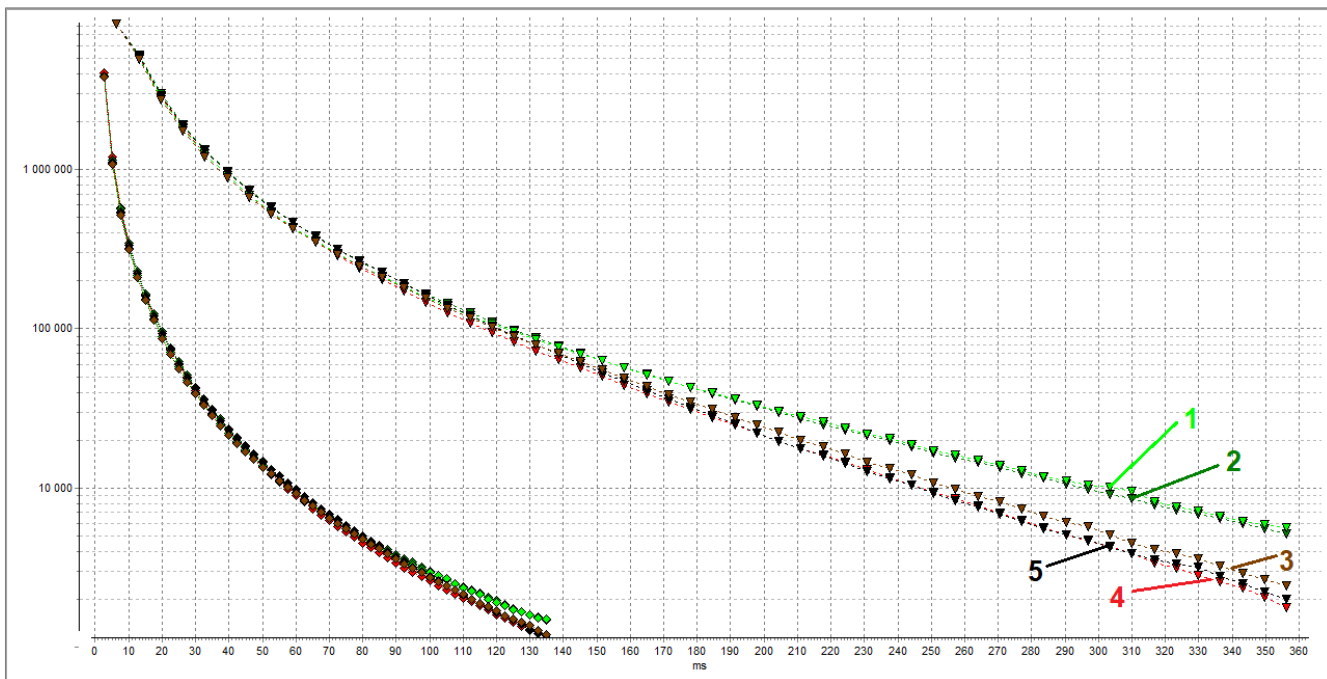


Рисунок 4.22 – Кривые спада: 1 – КС из базы знаний для целых четырех труб ($5\frac{1}{2}''+75/8''+103/4''+133/8''$), 2 – КС из скважины в интервале целых четырех труб ($5\frac{1}{2}''+75/8''+103/4''+133/8''$), 3 – КС из базы знаний для целых трех труб ($5\frac{1}{2}''+75/8''+103/4''$), 4 – КС из базы знаний для трех труб с коррозией в 3-й трубе ($5\frac{1}{2}''+75/8''+103/4''$), 5 – КС из скважин в интервале нарушения целостности обсадной колонны $133/8''$ и коррозии в $95/8''$ ($4\frac{1}{2}''+7''+95/8''$)

Выводы по главе 4

-Разработанная методика проведения интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии применялась для оценки технического состояния скважин ПХГ ПАО «Газпром» и нефтегазовых месторождений.

-Приведены результаты оценки нарушений 3-й, 4-й и 5-й колонн нефтегазовых скважин с использованием базы знаний.

-Результаты скважинных исследований подтверждены испытаниями и комплексом данных ГИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведённых 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 использованных источников

1. Головацкая Г.И. Магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия скважин [Электронный ресурс] / Г.И. Головацкая, А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, Л.Е. Кнеллер; ЗАО НПФ ГИТАС, ОАО НПП ВНИИГИС // 6th Saint Petersburg International Conference & Exhibition (Санкт-Петербург, 7–10 апр. 2014 г.) – СПб., 2014. – Th D 08. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140180>. (дата обращения: 17.02.2022).
2. Головацкая Г.И. Новая технология оценки технического состояния пятиколонных скважин на основе метода переходных процессов // Модернизация российского геофизического комплекса: материалы XXV науч.-практ. конф. (ГК «Кандрыкуль», 16 февраля 2021 г.) URL: <https://www.youtube.com/watch?v=aucYBE3y70I>. 10.54-22.30 (дата обращения: 17.02.2022).
3. Головацкая Г.И. Методика интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии-толщинометрии методом переходных процессов многоколонных скважин // Геофизика. – 2023. – №5. – С. 65–71.
4. 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.
5. Даниленко В.Н. Паспортизация обсадных колонн электромагнитными и электрическими методами ГИС / В.Н. Даниленко, А.П. Потапов, В.В. Даниленко, Л.Е. Кнеллер, А.Н. Наянзин // Геофизика на службе нефтяной промышленности: материалы VI Азербайджанской междунар. геофиз. конф. (Баку 14–17 окт. 2007 г.). – Баку, 2007. – С. 81–82.
6. Даниленко В.Н. Развитие магнитоимпульсной дефектоскопии для решения задач контроля технического состояния скважин, колтюбинга, промышленных трубопроводов / В.Н. Даниленко, А.П. Потапов, В.В. Даниленко и др // Тез.

докл. науч.-практ. конф. «Новая техника и технология для ГИС» в рамках XIX международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2011» (Уфа 25 мая 2011 г.) – Уфа: НПФ «Геофизика», 2011. – С. 159–166 (стенд. доклад)

7. Дмитриев В.И. Осесимметричное электромагнитное поле в цилиндрически слоистой среде / В.И. Дмитриев // Физика Земли.– М.: Наука, АН СССР, 1972. – № 11. – С. 56–61.

8. Дмитриев В.И. О методе численного решения задачи индукционного каротажа в неоднородных средах / В.И. Дмитриев, Е.Б. Захаров, И.В. Ильин // Физика Земли. – М.: Наука, АН СССР, 1972. – № 2. – С. 50–58.

9. Дмитриев В.И. Метод решения задач электродинамики неоднородных сред / В.И. Дмитриев, Е.В. Захаров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – М.: ЖВМ и МФ, 1970. – Т. 10, № 6. – С. 1458–1464.

10. Зубарев А.П. Информативность методов диагностики технического состояния эксплуатационных скважин ПХГ / А.П. Зубарев, Е.П. Акентьев, В.В. Одеров, С.А. Венско, М.Г. Дахнов, В.А. Сидоров // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2000. – Вып. 74. – С. 125–127.

11. Зубарев А.П. Методическое руководство по проведению магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой МИД-Газпром и обработке результатов измерений / А.П. Зубарев, В.И. Шамшин, В.Н. Даниленко. – М.: Газпром, 2003. – 95 с.

12. Зубарев А.П. К вопросу диагностики технического состояния забойного оборудования и обсадных колонн действующих скважин ПХГ магнитоимпульсным каротажом / А.П. Зубарев, С.А. Венско, М.Г. Дахнов, Г.И. Либерман // Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах: сборник, материалы науч.-практ. конф. «Пути развития и повышения эффективности электрических и электромагнитных методов изучения нефтегазовых скважин» (Новосибирск, Академгородок, 27–30 сент. 1999 г.) – Новосибирск, 1999. – С. 109–114.

13. Зубарев А.П. Техническая диагностика и дефектоскопия газовых скважин / А.П. Зубарев, С.А. Венско // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2002. – Вып.99. – С. 61–69.
14. Иванов О.В. Технология интерпретации электромагнитной дефектоскопии в программно-методическом обрабатывающем комплексе ЭМДС-И. Современные геофизические технологии / О.В. Иванов // Геофизические технологии XXI века: материалы науч.-практ. конф. – Оренбург, 2005. – С. 156–162.
15. Каталог ф. Sondex. – 2007. – №235. – С. 10–11.
16. Кауфман А.А. Теория индукционного каротажа / А.А. Кауфман. – Новосибирск: Наука, 1965. – 235 с.
17. Лифантьев А.В. Опытное-промышленное опробование магнитоимпульсных дефектоскопов-толщиномеров в скважинах многоколонной конструкции (на месторождениях АО «Татнефть») / А.В. Лифантьев, Р.И. Юсупов, В.А. Сидоров // Сборник тезисов международной конференции и выставки по геофизическому исследованию скважин, Москва 8–11 сент. 1998. – М., 1998. – С. 1–3.
18. Марков В.А. Исследование технического состояния скважин геофизическими методами / В.А. Марков, О.В. Иванов // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2004. – Вып. 5–6 (118–119) . – С. 245–253.
19. Марков В.А. Результаты диагностирования технического состояния скважин методами промысловой геофизики на объектах ООО «Оренбурггазпром» / В.А. Марков, Р.Г. Темиргалеев, В.И. Масленников, С.А. Михайленко // Техническое диагностирование оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородосодержащих сред: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Оренбург, 2000. – С. 85–89.
20. Марков В.А. Технология электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн разведочных и эксплуатационных скважин / В.А. Марков, В.Ф. Шулаев, В.И. Масленников, О.В. Иванов // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2004. – Вып. 5–6 (118–119) . – С. 259–265.

21. Миллер А.А. Контроль технического состояния обсадных колонн комплексным дефектоскопом ЭМДС-3 в нефтегазовых скважинах Омана [Электронный ресурс] / А.А. Миллер, А.В. Миллер, С.В. Степанов и др // 6th Saint Petersburg International Conference & Exhibition, Санкт-Петербург, 7–10 апр. 2014 г.) – СПб., 2014. - Th D 07. . URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140179> (дата обращения: 12.04.2022).
22. Миллер А.А. Способ оперативного расчета толщины стенок колонн по данным электромагнитной дефектоскопии / А.А. Миллер; ВНИИГИС. – Октябрьский, 2005. – 30 с. – Деп. в ВИНТИ 12.09.2005, №611-В 2005.
23. Морозова Т.М. Нестационарное электромагнитное поле токового контура, расположенного на оси полого проводящего магнитного цилиндра (решения и приложения задачи) / Т.М. Морозова, В.Ф. Полоканов, М.И. Эпов, К.С. Могилатов // Геология и геофизика. – Новосибирск: СО РАН, 2000. – №11, т. 41. – С. 1492–1500.
24. Новохатский М.И. Опыт применения электромагнитной дефектоскопии при диагностике технического состояния скважин / Состояние и перспективы ГИС-контроля для повышения геологической и экономической эффективности разработки газовых и газоконденсатных месторождений и эксплуатации ПХГ, (г. Кимры, апр. 2003 г.): материалы науч.-техн. совета ОАО «Газпром». – М.: ИРЦ Газпром, 2003. – С. 64–77.
25. Патент 2364719, Россия. 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.
26. Патент 2372478, Россия. Электромагнитный скважинный дефектоскоп / А.Н. Наянзин, А.П. Потапов; заявитель и патентообладатель ЗАО НПФ «ГИТАС». – №2008113923/03, заявл. 29.04.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. №31.

27. Патент 2333461, Россия. Скважинный магнитоимпульсный дефектоскоп-толщиномер / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, А.Н. Наянзин и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО НПФ «ГИТАС». – № 2006140920/03, заявл. 20.11.2006, опубл. 10.09.2008, Бюл.25.
28. Патент 2636064 РФ. Способ электромагнитной дефектоскопии в многоколонных скважинах / А.П. Потапов; заявитель и патентообладатель А.П. Потапов – № 2016128899, заявл. 14.07.2016; опубл. 20.11.2017.
29. Потапов А.П. Магнитоимпульсная дефектокопия-толщинометрия нефтегазовых скважин / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко // НТС «Вести газовой науки». – М., 2014. – № 4(20). – С. 188–195.
30. 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. – М.: ПАО «ГАЗПРОМ», 2023. – 101 ил., 150 с.
31. Потапов А.П. Учет влияния магнитной проницаемости и проводимости металла при определении толщины обсадных колонн по данным электромагнитной дефектоскопии / А.П. Потапов // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – М.: ВНИИОЭНГ, 2000. – С. 255–275.
32. Потапов А.П. Комплексование магнитоимпульсного дефектоскопа МИДК с профилемером MIT-Sondex – резерв повышения качества оценки технического состояния скважин / А.П. Потапов, В.В. Даниленко, Ли Чан // НТВ «Каротажник» – Тверь: АИС, 2010. – Вып. 6 (195). – С. 4–13.
33. Потапов А.П. Электромагнитная дефектоскопия с азимутальным и радиальным разрешением / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2016. – Вып. 6 (264). – С. 194–208.
34. Потапов А.П. Современное состояние электромагнитной дефектоскопии колонн нефтегазовых скважин / А.П. Потапов, Л.Е. Кнеллер, В.В. Даниленко // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2008. – Вып. 2(167). – С. 80–101.

35. Потапов А.П. Магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия обсадных колонн и насосно-компрессорных труб / А.П.Потапов, Л.Е. Кнеллер, В.Н.Даниленко и др. – М.: ВНИИГеосистем, 2012. – 146 с.
36. Потапов А.П. Технология оценки технического состояния обсадных колонн магнитоимпульсными дефектоскопами / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, И.Г. Головацкая // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2016. – Вып. 6 (264). – С. 112–134.
37. Потапов А.П. Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия скважин многоколонной конструкции методом переходных процессов / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, Л.Е. Кнеллер // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2016. – Вып. 6 (264). – С. 134–151.
38. Потапов А.П. Численное решение прямой и обратной задач импульсной электромагнитной толщинометрии обсадных колонн в скважинах / А.П. Потапов, Л.Е. Кнеллер // Геология и геофизика. – Новосибирск: Наука, 2001. –Т. 42, № 8. – С. 1279–1284.
39. Потапов А.П. Математическое моделирование и интерпретация материалов скважинной импульсной электромагнитной толщинометрии / А.П. Потапов, Л.Е. Кнеллер // Геофизика. – Тверь: ГЕРС, 2000. – № 5. – С. 27–30.
40. Потапов А.П. Оценка технического состояния скважин методом магнитоимпульсной дефектоскопии [Электронный ресурс] / А.П.Потапов, В.В. Даниленко // К эффективности через сотрудничество (Тюмень, 2–5 марта 2009 г.): сб. тр. второй Междунар. геол.-геоф. конф. и выставки (стенд. доклады «ГИС при разработке и эксплуатации месторождений нефти и газа»), 1 электр.опт.диск (CD-ROM).
41. Потапов А.П.Магнитоимпульсный сканирующий дефектоскоп для исследования обсадных колонн и НКТ / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, А.Н. Наянзин, В.И. Шамшин // Сб. материалов V российско-китайского симпозиума по про-

мысловой геофизике (Москва 23–26 сент. 2008 г.) – Уфа: НПФ «Геофизика», 2008. – Ч. 2. – С. 135–139.

42. Потапов А.П. К теории метода скважиной магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии / А.П. Потапов, Л.Е. Кнеллер, В.В. Даниленко // Геофизика. – М.: ЕАГО, 2012. – Вып. 2. – С. 20–26.

43. Потапов А.П. Магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия обсадных колонн большого диаметра / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко // Юбилейная XX науч.-практ. конф. «Новая техника и технологии для ГИС»: Тез. докл. конф. в рамках XXII Междунар. специальной выставки «Газ.Нефть.Технологии-2014» (22–23 апр. 2014 г.) – Уфа: Изд-во «НПФ Геофизика», 2014. – С. 89–95.

44. Потапов А.П. Новые возможности магнитоимпульсной дефектоскопии / А.П. Потапов, В.Г. Уметбаев // Газовая промышленность. – 2017. – № 11 (760). – С. 114–119.

45. Потапов А.П. Технология оценки технического состояния обсадных колонн магнитоимпульсными дефектоскопами / А.П. Потапов, В.В. Даниленко, В.Н. Даниленко, Г.И. Головацкая / Нефть. Газ. Новации. – 2017. – № 2. – С. 20–25.

46. 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.

47. Потапов А.П. Магнитоимпульсное радиальное зондирование и азимутальное сканирование обсадных труб и НКТ многоколонных скважин / А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, Г.И. Головацкая, Р.Р. Куйбышев, А.А. Исеева, В. И. Шамшин // Газовая промышленность. – 2022. – № S3 (838). – С. 106–114.

48. 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 // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2021. – Вып. 4 (310). – С. 76–89.

49. Потапов А.П. Дефектоскопия-толщинометрия обсадных труб нефтегазовых скважин на основе метода переходных процессов [Электронный ресурс] / А.П. Потапов, В. Н. Даниленко, Л. Е. Кнеллер, Г. И. Головацкая // «Современные технологии в нефтегазовом деле – 2014»: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Уфа: Аркаим, 2014. – Т.1. – С. 152–156.

50. 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 // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2021. – Вып. 4 (310). – С. 76–89. (По итогам IV Междунар. науч.- практ. конф. «Технологии и аппаратура для геофизических исследований в скважинах при решении актуальных задач разведки и разработки нефти, газа, твердых полезных ископаемых» – Октябрьский, 13–16 октября 2021 г.)

51. Сидоров В.А. Магнитоимпульсная дефектоскопия колонн в газовых скважинах / В.А. Сидоров // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 1999. – № 47. – С. 74–79.

52. Сидоров В.А. Методическое руководство по проведению дефектоскопии-толщинометрии в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой МИД-Газпром и обработке результатов измерений / В.А. Сидоров, А.П. Потапов, В.Н. Даниленко, Л.Е. Кнеллер и др. – М.: ВНИИгеосистем, 2011. – 148 с.

53. Сидоров В.А. Скважинные дефектоскопы-толщинометры для исследования многоколонных скважин / В.А. Сидоров // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 1996. – Вып. 24. – С. 84–94.

54. Сидоров В.А. Автономные скважинные дефектоскопы / В.А. Сидоров, С.В. Степанов, М.Г. Дахнов, В.Г. Бажедомов, Д.Ю. Пятницкий // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 1997. – Вып. 34. – С. 74–78.

55. Теплухин В.К. Вопросы скважинной электромагнитной толщинометрии при контроле технического состояния нефтегазовых скважин / В.К. Теплухин, А.В. Миллер, О.М. Казакова, А.А. Миллер // Геофизические исследования в нефтегазовых скважинах: сборник / ОАО НПП «ВНИИГИС». – Уфа: Изд-во БГУ, 1998. – С. 187–209.

56. Теплухин В.К. Развитие электромагнитных методов исследования / В.Т. Теплухин, А.В. Миллер, А.А. Миллер, Е.М. Мурзаков, С.В. Степанов, В.Г. Судничников, О.М. Казакова // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2001. – Вып. 82. – С 123–127.

57. Теплухин В.К. Изучение технического состояния обсадных, бурильных и насосно-компрессорных труб методом электромагнитной дефектоскопии / В.К. Теплухин, А.В. Миллер, А.А. Миллер и др // Материалы республиканской научно-техн. конференции. – Октябрьский, 1999. – С. 258–265.

58. Теплухин В.К. Сканирующий электромагнитный дефектоскоп для обследования обсадных колонн / В.К. Теплухин, А.В. Миллер, А.А. Миллер и др // Материалы Международной научно-практ. конференции. – Октябрьский, 2001. – С. 324–331.

59. Теплухин В.К. Вопросы электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн / В.К. Теплухин, А.В. Миллер, В.А. Сидоров // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 1997. – Вып. 33. – С. 68– 71.

60. Теплухин В.К. Электромагнитная дефектоскопия обсадных колонн / В.К. Теплухин, В.А. Сидоров // Материалы Международной геофизич. конференции SEG-EAGO. – Москва, 1993. – С. 121.

61. Теплухин В.К. Совершенствование аппаратуры и технологии скважинной электромагнитной дефектоскопии / В.К. Теплухин, А.В. Миллер, А.А. Миллер, Е.М. Мурзаков и др // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2006. – Вып. 149–149 (7–8). – С. 173–183.

62. Теплухин В.К. Проблемы электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн и пути их реализации / В.К. Теплухин, А.В. Миллер, А.А. Миллер и др. // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2002. – Вып. 96. – С. 41–51.
63. Ткаченко А.К. Аппаратура и технология электромагнитной дефектоскопии нефтегазовых скважин / А.К. Ткаченко, С.А. Калташев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы европейской территории России и Урала: материалы регион. конф., посвященной 300-летию горно-геологической службы России. – Екатеринбург, 2000. – С. 147–148.
64. Шейнман С.М. Об установлении электромагнитных полей в земле / С.М. Шейнман // Прикладная геофизика. – М., 1997. – Вып. 3. – С. 3–35.
65. Шумилов А.В. Дефектоскопия скважин и контроль щелевой гидрореструйной перфорации методами ГИС / А.В. Шумилов // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2001. – Вып. 79. – С. 59–66.
66. Шумилов А.В. Опыт электромагнитной дефектоскопии нефтяных скважин с многоколонной конструкцией в Пермской области / А.В. Шумилов, С.А. Калташев, В.А. Мельник, Г.М. Толкачев, Л.Л. Петухова // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2000. – Вып. 67. – С. 28–35.
67. Шумилов А.В. Практика применения электромагнитной дефектоскопии в скважинах нефтяных месторождений Пермской области / А.В. Шумилов, С.А. Калташев, Г.М. Толкачев, В.А. Мельник // Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах: сборник, материалы науч.-практ. конф. «Пути развития и повышения эффективности электрических и электромагнитных методов изучения нефтегазовых скважин» (Новосибирск, Академгородок, 27–30 сент. 1999 г.) – Новосибирск, 1999. – С. 120.
68. Шурина Э.П. Математическое моделирование нестационарного электромагнитного поля дефектоскопа обсадных колонн / Э.П. Шурина, А.В. Гельбер, М.А. Гельбер, М.И. Эпов // Вычислительные технологии / Новосибирский гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 2002. – Вып.7. – № 6. – С. 114–129.

69. Электромагнитный прибор для определения износа колонны с непрерывной записью ИКП1 / «ООО фирма РИАЛОГ // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 1998. – Вып.53. – С. 111–112.

70. Эпов М.И. Определение параметров ферромагнитного проводящего цилиндрического слоя по данным метода становления поля / М.И. Эпов, Г.М. Морозова, Е.Ю. Антонова // Геология и геофизика, 2005. – Т.45, № 11. – С. 1358–1368.

71. Эпов М.И. Электромагнитные процессы в проводящей магнитной обсадной колонне / М.И. Эпов, Г.М. Морозова, Е.Ю. Антонова // Геология и геофизика, 2007.– Т.48.– № 6. – С. 673–684.

72. Эпов М.И. К теоретическому обоснованию электромагнитного сканера металлических колонн нефтегазовых скважин / М.И. Эпов, Г.М. Морозова, В.Ф. Польшгалов, В.С. Могилатов, А.С. Мартынов // Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах: сборник, материалы науч.-практ. конф. «Пути развития и повышения эффективности электрических и электромагнитных методов изучения нефтегазовых скважин» (Новосибирск, Академгородок, 27–30 сент. 1999 г.) – Новосибирск, 1999. –С.61–71.

73. Яхин А.М. Некоторые следствия из теории электропроводящих магнитных пленок применительно к решению задач каротажа толщины и оценки технического состояния обсадных колонн / А.М. Яхин // Геофизические исследования в нефтегазовых скважинах: сборник / ОАО НПП «ВНИИГИС». – Уфа: Изд-во Башкир. ун-та, 1998. – С. 209–216.

74. Aslayan I. Time-domain magnetic defectoscopy for tubing and casing corrosion detection / Aslayan A., Aslayan I., Arbuzov A., Zagidulin B. // SPE international journal. – 2014. – 12–14 May. – SPE 169601-ms.

75. Daghmouni H. B. Quantitative Multi-Barrier Evaluation Through Dual Completion Using Time-Domain Electromagnetic Measurements / Daghmouni H. B.,

Al-Shanti S., Vorozhikhin S., Iqbal P., Dutta S., Ismail M. // SPE international journal. – 2022. – October. – SPE-211171-MS.

76. Dai J. Extending the Capability of Electromagnetic Corrosion Inspection Beyond Five Tubulars / Dai J., Fouada A., Wang X., Hill F. // SPE international journal. – 2022. – October. – SPE-211502-MS.

77. Dalia Abdallah. Casing Corrosion Measurement to Extend Assed Life / Dalia Abdallah, Mohamed Fahim, Khaled Al-Hend and others // Shlumberger, 2013. – Vol.25, № 3. – P. 18–31.

78. Dutta S. Analysis and interpretation of multi-barrier transient electromagnetic measurement / S. Dutta, J. Olaiy // SPWLA 16th Annual Logging Symposium, (Virtual Online Webinar, june 24 – july 29, 2020). DOI: 10.30632/SPWLA-5008.

79. Martin L. E. New New High-Definition Frequency Tool for Tubing and Multiple Casing Corrosion Detection / Martin L. E., Fouada A. E., Amineh R. K. and others // SPE international journal. – 2017. – November, 10. – 2118/188932-MS.

80. XieRanghua. Методика обнаружения повреждений обсадных труб по данным электромагнитного дефектоскопического каротажа / XieRanghua, Liu-Jisheng, ThangYaeqie, CejingJishu // Well logging. Technol, 2003. – V. 27, № 3. – P. 242–245.

81. YancaiSun. Обнаружение дефектов в многослойных обсадных трубах с использованием сква-жинных электромагнитных измерений / YancaiSun, HuaTheng, YanhuiCuiCejingjishu // Well logging. Technol, 2003. – V. 27, № 3. – P. 246–249.

82. Yanxiang Yu. An Advanced Technique for Simultaneous in Situ Inspection of Multiple Metallic Tubulars / Yanxiang Yu, William Redfield, Nicholas Boggs, Kuang Qin, Marvin Rourke and Jeff Olson // SPE international journal. – 2019. – March. - SPE-194269-MS.