

А.К. ШЕПЕЛЕВ

А.М. ДОБРЕНКО

В.П. ЛУНИН, д-р техн. наук, проф.

В.А. ГЛАДОВСКИЙ

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

ИСПЫТАНИЯ СПРОЕКТИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНО-ВИХРЕТОКОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТРУБ

Аннотация. Оценка состояния ферромагнитных трубопроводных систем и металлических сооружений представляет собой одну из ключевых задач в области промышленной безопасности. Большинство известных методов неразрушающего контроля и диагностики нередко предполагают прямой контакт с объектом либо сопряжены со значительными финансовыми и энергетическими затратами. В работе изучена перспектива применимости импульсно-вихретокового метода для контроля коррозионных дефектов ферромагнитных труб под изоляцией. Разработана аппаратная реализация устройства и проведены его испытания. Показано, что характеристики спадающего участка импульсного вихретокового сигнала реагируют на присутствие дефектов в исследуемом объекте. Результаты исследования свидетельствуют о работоспособности разработанного устройства и открывают возможность для его применения в современных системах неразрушающей диагностики в нефтяной и газовой промышленности.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ферромагнитные трубопроводы, вихретоковый преобразователь, обнаружение дефектов, анализ импульсного отклика

Введение

Сталь и ферромагнитные материалы служат основой современной промышленности, находя применение в строительстве, энергетике, нефтегазовом секторе, транспортном и авиационном машиностроении. По оценкам World Steel Association, мировое потребление стали в 2024 году достигло порядка 1,79 млрд. тонн, что отражает устойчивый спрос на металлоконструкции во всех ключевых отраслях [1].

Особую роль среди отраслей-потребителей металла занимает нефтегазовый комплекс, где трубопроводный транспорт является наиболее экономически эффективным способом доставки углеводородного сырья на большие расстояния.

Расширение мировой экономики сопровождается ростом трубопроводных сетей. По данным Global Energy Monitor [2], в 2025 году в эксплуатации находится свыше 504 тыс. км магистральных нефтепроводов, ещё около 42 тыс. км – на стадии строительства или проектирования, что на 16% больше, чем годом ранее. Это наглядно демонстрирует актуальность задачи поддержания надёжности трубопроводной инфраструктуры.

Совокупное воздействие агрессивных сред, перепадов давления и механических напряжений в теле трубопровода со временем формируют очаги равномерной и питтинговой коррозии, зоны эрозионного износа и

коррозионного растрескивания. Наибольшую угрозу представляют скрытые повреждения, которые на начальном этапе не сказываются на функциональности системы и потому долгое время не выявляются.

Утонение стенки вследствие коррозии ведёт к снижению прочности трубопровода и может стать причиной его разгерметизации, сопровождающейся утечкой транспортируемого продукта, возгоранием и загрязнением окружающей среды. Это определяет первостепенную важность раннего выявления коррозионных дефектов и контроля остаточной толщины стенки в системе технической диагностики.

Регулярный мониторинг технического состояния металлических конструкций на протяжении всего срока эксплуатации является необходимым условием предотвращения аварийных ситуаций. Наиболее эффективным инструментом в этом отношении служат методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие выявлять дефекты без вывода объекта из эксплуатации [3].

Настоящая работа направлена на исследование применимости импульсного вихретокового метода для выявления и количественной оценки коррозионных повреждений в ферромагнитных материалах с изоляционным покрытием.

В рамках исследования были поставлены следующие задачи:

- создание лабораторного стенда для испытания преобразователя;
- формирование методологии проведения экспериментальных измерений;
 - построение градуировочной характеристики и оценка чувствительности устройства.

Описание лабораторной установки

Измерения проводились на лабораторном стенде, включающем генератор импульсных сигналов, приёмник-усилитель, микроконтроллер и два индикаторных устройства для визуального контроля формы, скважности и амплитуды импульсов. Измерения выполнялись с использованием двух преобразователей на выбор, содержащих возбуждающую и приёмную катушки; их конструкция приведена на рисунке 1 а, г.

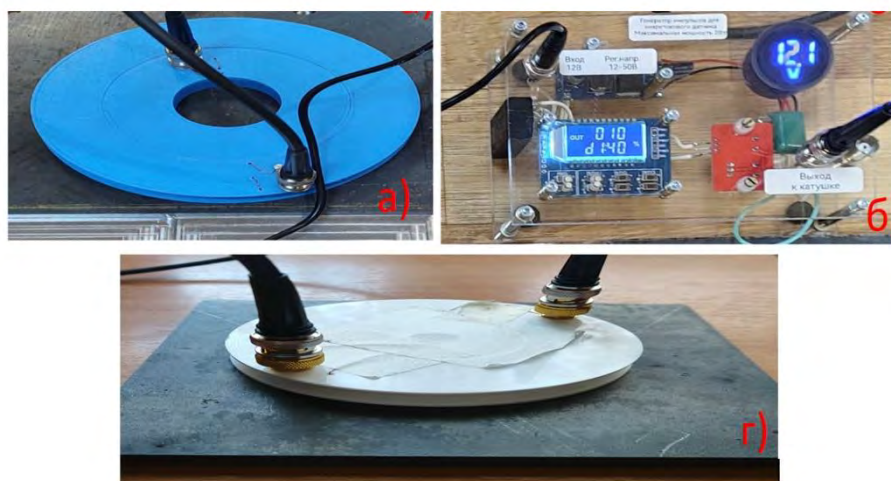


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а) преобразователь №1; б) генератор импульсов; г) преобразователь №2

Сигнал с измерительной катушки усиливается и логарифмируется в блоке приёмника-усилителя, что повышает чувствительность системы в области слабых сигналов. Для оцифровки и передачи данных на персональный компьютер использовалась платформа Arduino Uno.

Объекты исследования

Для экспериментов были изготовлены образцы из магнитной стали с искусственными дефектами, имитирующими питтинговую коррозию. Образец первого типа толщиной 10 мм имел четыре участка с питтинговыми дефектами в виде сквозных отверстий диаметром 10 мм, соответствующих остаточной толщине стенки 100, 80, 50 и 20% от номинала (Рис. 2, а). Второй вид представлен пятью образцами толщиной 12 мм с питтинговыми дефектами переменной глубины согласно тем же процентным уровням (Рис. 2, б).

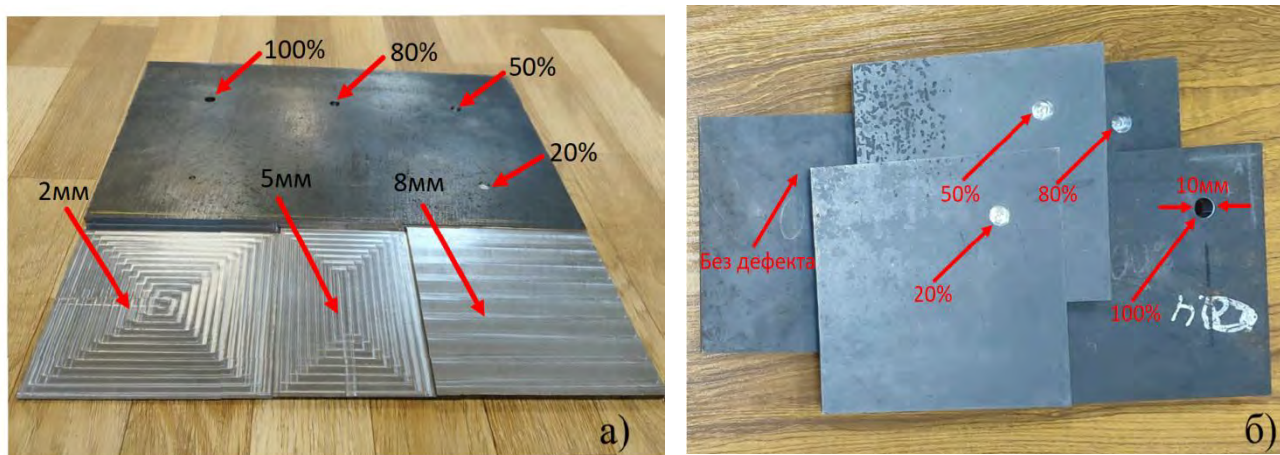


Рис. 2. Образцы для контроля: а) толщиной 10 мм; б) толщиной 12 мм

Воспроизводимость измерений при выявлении питтингов разной глубины на образцах №1 и №2

В качестве диагностического параметра использовался тангенс угла наклона линейного участка затухающего сигнала. Преобразователь №1 располагался на поверхности образца №1 таким образом, чтобы дефект находился в зоне максимальной чувствительности приёмной катушки. На каждом дефекте выполнялось пять измерений с усреднением по 10 отсчётам, после чего преобразователь переносился к следующему дефекту. Результаты обработки сигналов показаны на рисунке 3. Из рисунка 3 следует, что доверительные интервалы для ряда глубин дефектов существенно накладываются друг на друга. Дефекты глубиной 80% и 100%, а также 20% и 50% практически неразличимы по разбросу градиента.

Для улучшения характеристик измерительного тракта схема платы была доработана. Новая плата отличалась применением усилителя с более широким динамическим диапазоном и стабильными линейными характеристиками, что позволило повысить точность и достоверность получаемых результатов.

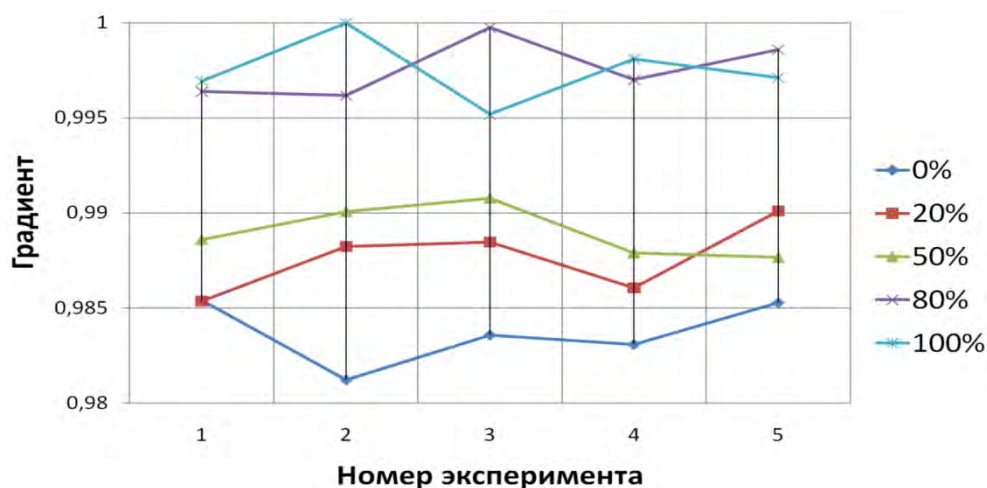


Рис. 3. Разброс диагностического параметра в зависимости от глубины дефекта (значения нормированы относительно сквозного дефекта)

Анализ средних значений градиента и доверительных интервалов, приведённых в таблице 1, свидетельствует об улучшении качества измерений после модернизации платы.

Табл. 1. Сравнение доверительных интервалов градиента для разных глубин дефекта после модернизации усилителя

Уровень дефекта	Средний градиент (10 усреднений)	Диапазон градиентов (нормированный относительно сквозного дефекта)
0%	~0,934	0,930–0,936
20%	~0,954	0,942–0,959
50%	~0,982	0,973–0,988
80%	~0,980	0,986–0,972
100%	~0,994	0,987–1

Однако достигнутое улучшение не позволяет в полной мере решить проблему разграничения дефектов с близкими значениями глубины. С целью проверки предположения о необходимости уменьшения размеров преобразователя для контроля малых дефектов был проведён дополнительный эксперимент с применением катушки меньшего размера (рис. 4).

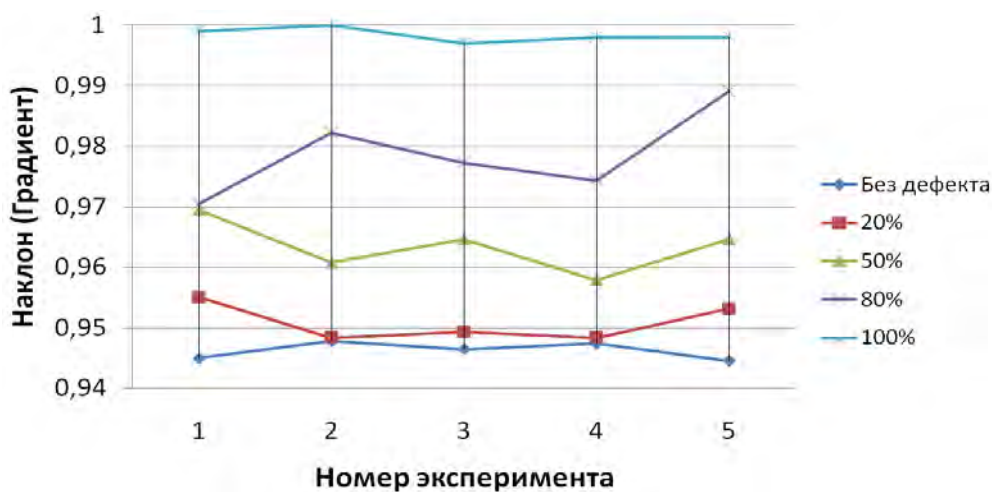


Рис. 4. Результаты измерений преобразователя №2 для дефектов различной глубины (нормированные значения по сигналу от сквозного дефекта)

Использование уменьшенной катушки позволило полностью устранить перекрытие доверительных интервалов. Повышение точности определения диагностического параметра и исключение перекрытия доверительных интервалов было достигнуто за счёт исследования новых функций аппроксимации сигналов, полученных на образцах №1 и №2 (табл. 2).

Табл. 2. Сравнительный анализ разброса диагностического параметра для различных методов аппроксимации

Образец Способы	Без дефекта (образец №1), 10^{-5}	Сквозной дефект (образец №2), 10^{-5}	Без дефекта, (образец №2) 10^{-5}
Аппроксимация с помощью суммирования функций	7,31	5,551	4,659
Аппроксимация, включающая сигмоиду на основе гиперболического тангенса	5,79	4,375	3,912
Аппроксимация, включающая логистическую сигмоиду	3,02	2,753	3,526
Аппроксимация, включающая двойную сигмоиду	1,85	8,595	3,74

Работоспособность нового способа аппроксимации применительно к локальным дефектам исследовалась на образце №1. Преобразователь последовательно устанавливался в фиксированные положения от бездефектного участка до зоны сквозного дефекта, в каждой точке выполнялось по три измерения. Полученная калибровочная характеристика представлена на рисунке 5.

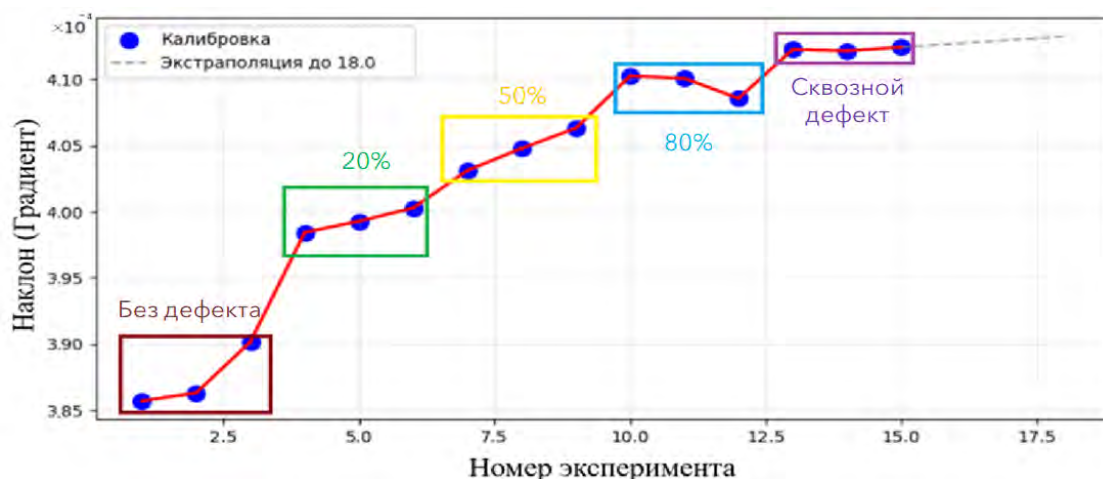


Рис. 5. Различение локальных дефектов на образце №1 с использованием улучшенного метода

Полученные значения диагностического параметра для бездефектной зоны и дефектов различной глубины имеет статистически значимые различия, что обеспечивает надёжное определение степени коррозионного поражения.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило принципиальную возможность использования импульсного вихретокового метода для обнаружения и количественной оценки питтинговых дефектов в ферромагнитных трубопроводах. Экспериментальные испытания на образцах толщиной 10 и 12 мм показали, что тангенс угла наклона затухающего сигнала является информативным диагностическим параметром. Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного устройства и его перспективность для применения в системах неразрушающего контроля ферромагнитных нефтегазовых трубопроводов.

Список литературы

1. Steelonthenet. Steel consumption statistics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.steelonthenet.com/resources/market-data/consumption.html>
2. Global Energy Monitor. Global Oil Infrastructure Tracker [Электронный ресурс]. URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-oil-infrastructure-tracker>
3. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / под общ.ред. В.В. Клюева. Т. 2: в 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003.

Контакты:

sashashep17ru@gmail.com (Шепелев Александр Константинович)

DobrenkoAM@mpei.ru (Добренко Алексей Михайлович)

LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)

GladovskyVA@mpei.ru (Гладовский Вадим Александрович)

УДК 620.179.16:681.7

А. В. ШИЛОВ¹, канд. физ.-мат. наук

А. Б. СОТСКИЙ¹, д-р физ.-мат. наук, проф.

Е. А. ЧУДАКОВ¹, канд. физ.-мат. наук

Д. В. ПОНКРАТОВ¹

М. Э. ПОДЫМАКО²

¹Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова (Могилев, Беларусь)

²ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Беларусь)

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ БАЛОК

Аннотация. Предложен и апробирован экспериментально метод оптического контроля ориентации и размеров параллельных вертикальных балок, основанный на модели прямоугольного поперечного сечения балки. Метод предполагает использование лазерного уровня и оптического теодолита, имеет субмиллиметровую точность и прост в реализации.

Ключевые слова: дистанционный контроль конструкций, лазерный уровень, оптический теодолит, обратная оптическая задача.

Введение. Дистанционный оптический контроль конструкций, содержащих прямоугольные параллельные балки, востребован в шахтах и в