

ния. Полученные формулы определяют составляющую погрешности измерений НЭП, обусловленную взаимодействием антенн без учёта неоднородности поля в пределах приёмной антенны. Фазовая и амплитудная поправки к НЭП, определяемые близостью антенн, а также оценка неоднородности поля приведены в [10].

Л и т е р а т у р а

1. Гошин Г. Г. Граничные задачи электродинамики в конических областях. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987.
2. Соколов И. В. Параметры измерительной биконической антенны // Измерительная техника. 1986. № 11. С. 51—52.
3. Бузинов В. С., Иванов П. Е., Исхакова Н. Н. Исследование точности конструкции конусов для образцовых биконических антенн // Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: Сб. науч. тр. ВНИИФТРИ. М., 1987. С. 150—152.
4. Айзенберг Г. З. Антенны для магистральных радиосвязей М.: Связьиздат, 1948.

5. Коротковолновые антенны / Под ред. Г. З. Айзенберга. М.: Радио и связь, 1985.

6. Антенны / Пер. с англ. под ред. А. И. Шпунтова. М.: Сов. радио, 1951.

7. Пистолькорс А. А. Антенны. М.: Связьиздат, 1947.

8. Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И. Поля и токи тонкой биконической антенны. Параметры и токи антенны в режиме измерения // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 55—58.

9. Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И. Рассеянное биконической антенной поле // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 52—56.

10. Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И., Баженов Н. Р. Исследование поля тонкой биконической антенны в режиме генерации // Измерительная техника. 2011. № 10. С. 43—48.

Дата принятия: 28.09.2016.

620.179.143

Экспериментальная проверка расчётной модели намагниченного участка трубопровода с искусственными дефектами

П. А. КУЗНЕЦОВ, С. А. МАННИНЕН, А. А. ЖУМАГАЛИЕВА

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей» им. И. В. Горынина Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»,
Санкт-Петербург, Россия, mail@crism.ru

Представлена расчётная модель намагниченного участка трубопровода, созданная для математического обеспечения нового перспективного метода внутритрубной дефектоскопии. Проведена проверка применимости расчётной модели на экспериментальном стенде, содержащем контрольный отрезок трубы с нанесёнными искусственными дефектами различной формы. Значения индукции магнитного поля внутри трубы вблизи дефектов, полученные с помощью расчётной модели, сопоставлены с данными, полученными в процессе измерений магнитного поля индукционным и феррозондовым датчиками. На основе анализа результатов расчёта даны рекомендации по улучшению возможностей измерительной системы дефектоскопа.

Ключевые слова: внутритрубная дефектоскопия, коррозионные повреждения трубопровода, метод конечных элементов.

The calculation model of the magnetized pipeline part for mathematical support of the new intratube defectoscopy method is proposed. The checking of model applicability was conducted on the experimental stand with a control pipe part with the marked artificial defects of different shapes. The results of measurements of magnetic field inside tube close to defects by means of inductive fluxgate sensors and of obtained by computer models were compared. On the basis of the obtained calculated results recommendations for improvement of defectoscope measurement system capabilities are given.

Key words: intratube defectoscopy, pipeline corrosion damage, finite element method.

Современные методы магнитной диагностики широко используются для неразрушающего контроля различных металлических изделий [1]. К таким методам относится метод измерения параметров поля переменного тока (ACFM, Alternating Current Field Measurement), широко освещённый в публикациях начиная с 1980-х гг. [2]. Суть данного метода заключается в намагничивании участков исследуемого образца с помощью катушки переменного тока и индикации

возникающих при этом полей рассеяния [3]. Данный метод может быть применён для внутритрубной дефектоскопии. Из-за особенностей формы трубы оптимальным способом намагничивания является намагничивание переменным током, текущим по трубе. В неповреждённой трубе магнитное поле отсутствует. Если на внутренней или внешней поверхности трубы имеются дефекты (трещины, вкрапления, коррозионные повреждения), магнитная проницаемость

которых отличается от магнитной проницаемости основного материала трубы, то вблизи таких дефектов наблюдается нескомпенсированное магнитное поле.

Одним из перспективных направлений применения данного подхода в энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве является диагностика трубопроводов малых диаметров, т. е. выявление и оценка различного рода повреждений, в том числе коррозионных. Для лучшего понимания процессов намагничивания трубы при протекании через неё переменного электрического тока необходимо численное моделирование распределения магнитного поля вблизи различных дефектов. Для решения данной задачи наиболее приемлемым методом моделирования является метод конечных элементов [4].

Для математического обеспечения нового метода внутритрубной дефектоскопии и разработки опытного образца контрольно-измерительного робототехнического комплекса была создана компьютерная модель намагниченного участка трубопровода [5]. Цель данной работы — проверка применимости разработанной модели для расчёта распределения индукции поля вблизи дефектов в намагниченном трубопроводе и выработка рекомендаций по повышению измерительных возможностей метода.

Описание модели. Расчётная (компьютерная) модель намагниченного участка трубопровода была создана с использованием метода конечных элементов с помощью программных пакетов Comsol multiphysics и Elcut. Разработанная расчётная модель позволяет получать распределение амплитуды индукции переменного магнитного поля внутри трубы на заданном расстоянии от её внутренней поверхности.

Проверка формы сигнала. Проверка корректности разработанной расчётной модели производилась на экспериментальном стенде в университете ИТМО. Данный стенд содержит контрольный отрезок трубы длиной 9 000 мм, диаметром 1 000 мм и толщиной 10 мм. На внутреннюю поверхность трубы нанесены искусственные дефекты различной формы, в том числе сквозные. Для исследования была выбрана серия дефектов в виде цилиндрических отверстий диаметром 5—15 мм, так как согласно экспериментальным данным уровень измеренного сигнала для данных дефектов превышает уровень шума.

Индукцию магнитного поля внутри трубы измеряли с помощью индукционных преобразователей магнитного дефектоскопа. Диаметр катушки индукционного датчика 11 мм, длина катушки 9 мм. Стандартный зазор между блоком преобразователей и поверхностью трубы составляет 15 мм, что обеспечивает расстояние 20 мм до центра катушек.

На рис. 1 показаны распределение амплитуды сигнала индукционного преобразователя (кривая 1) и расчётная амплитуда индукции магнитного поля (кривая 2) вдоль дуги направляющей окружности цилиндра. Поскольку используемый преобразователь не откалиброван на реальное значение индукции магнитного поля, для сравнения между собой экспериментальные и расчётные кривые нормализованы на единицу по максимальному пиковому значению. Ширина расчётного пика совпадает с шириной экспериментального пика. Также совпадает и форма сигналов, в частности, по бокам от главного пика имеют место провалы. Данные провалы связаны с поворотом вектора амплитуды магнитного поля перпендикулярно оси преобразователя и обращением в нуль измеряемой компоненты данного вектора.

Зависимость индукции магнитного поля от диаметра сквозных дефектов. Для проверки численных значений ин-

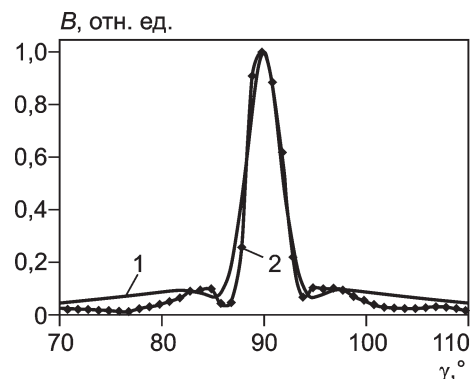


Рис. 1. Сравнение формы расчётного распределения амплитуды индукции магнитного поля B (1) вблизи сквозного дефекта диаметром 15 мм с формой пика измеренного сигнала (2); γ — угловая координата цилиндрической системы координат

дукции магнитного поля, получаемого при моделировании, были проведены дополнительные измерения данных величин феррозондовым преобразователем НВ0302.4а (ООО «НПО «Энт», Россия). Измерена амплитуда индукции магнитного поля напротив каждого дефекта из указанной выше серии на расстоянии 20 мм от внутренней поверхности трубы. При проведении эксперимента измеряли компоненту индукции магнитного поля, направленную по касательной к направляющей окружности цилиндра. Результаты измерений амплитуды индукции для отверстий диаметром 6—10 мм представлены на рис. 2; также на данном графике представлены расчётные данные для этой серии дефектов. Результаты расчёта и эксперимента совпадают при большом диаметре отверстия (10 мм). С уменьшением этого диаметра, измеренное значение сигнала становится меньше расчётного. Несовпадение расчётных и экспериментальных данных можно объяснить некорректным измерением магнитного поля от узких отверстий. В случае, если ширина измеряемого пика становится меньше поперечных размеров преобразователя, то он показывает меньшее значение магнитного поля, поскольку поток поля пронизывает не всю площадь измерительного контура катушки.

Рекомендации по улучшению измерительных возможностей метода. Одной из проблем, возникающих в процессе идентификации дефектов, является подобие формы распределения амплитуды сигнала. Если форма сигналов от разных типов дефектов подобна, то становится затруднительно определить параметры дефекта. Например, у плоскостного цилиндрического дефекта есть два параметра — глубина и диаметр. При этом пики сигналов отличаются друг от друга только по одному параметру — высоте. Соответственно, невозможно отличить более широкий и мелкий дефект от более узкого и глубокого.

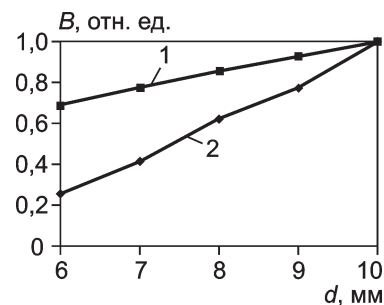


Рис. 2. Сравнение пиков измеренного сигнала (2) и расчётного распределения амплитуды индукции магнитного поля B (1) вблизи сквозного дефекта

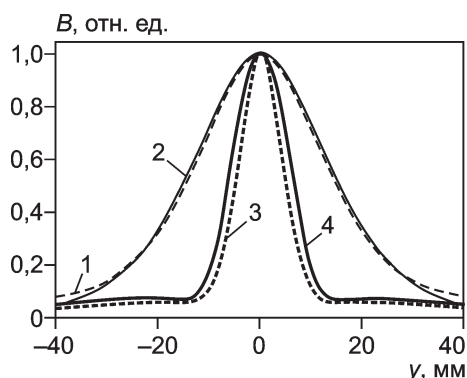


Рис. 3. Форма расчётного распределения амплитуды индукции магнитного поля B вблизи трёх различных плоскостных дефектов на расстоянии 5 и 20 мм от стенки трубы:

1 — диаметр дефекта 5 мм, глубина дефекта 4 мм, поле на расстоянии 20 мм от стенки трубы; 2 — диаметр 10 мм, глубина 3 мм, расстояние 20 мм; 3 — диаметр 5 мм, глубина 4 мм, расстояние 5 мм; 4 — диаметр 10 мм, глубина 3,3 мм, расстояние 5 мм; y — поперечная координата (угловая координата цилиндрической системы координат, переведённая в линейные величины)

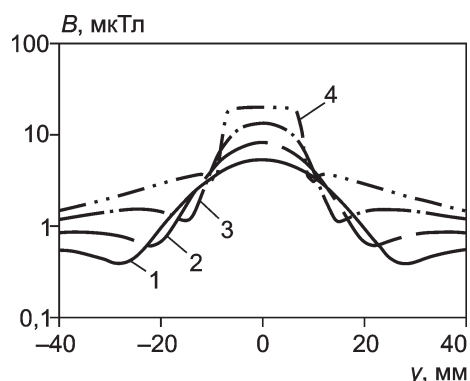


Рис. 4. Форма расчётного распределения амплитуды индукции магнитного поля B вблизи сквозного дефекта диаметром 15 мм на различном расстоянии от стенки:

1, 2, 3, 4 — расстояние от стенки 15; 10; 5; 1 мм, соответственно

Расчётные распределения амплитуды индукции магнитного поля для трёх разных дефектов представлены на рис. 3. Диаметр и глубина дефектов соответственно составляют 5 и 4 мм, 10 и 3 мм, 10 и 3,3 мм. На расстоянии 20 мм от внутренней поверхности трубы пики от первого и второго дефектов имеют одинаковую высоту и ширину (кривые 1, 2) и, следовательно, не могут быть различимы данным методом. На расстоянии 5 мм от внутренней поверхности трубы по высоте совпадают пики первого и третьего дефекта, однако они различаются по ширине (кривые 3, 4), что может быть использовано для их идентификации.

Таким образом, одним из подходов к повышению измерительных возможностей данной системы может быть уменьшение зазора между преобразователем и стенкой трубы. На рис. 4 показано расчётное распределение амплитуды индукции магнитного поля вблизи сквозного дефекта диаметром 15 мм на различном расстоянии от стенки трубы. При уменьшении расстояния до стенки трубы форма

сигнала изменяется. Подобие формы сигналов для дефектов разных диаметров нарушается, соответственно появляется возможность дифференцировать дефекты, различные по глубине и ширине.

Заключение. Форма пиков сигналов расчётных и экспериментальных кривых совпадает. Провалы поля по бокам главного пика на расчётных и экспериментальных кривых свидетельствуют о повороте вектора амплитуды поля перпендикулярно оси преобразователя.

Наблюдается тенденция быстрого спада значений экспериментальных пиков по сравнению с расчётными. Данное снижение экспериментальных пиков возможно связано с некорректным измерением высоты пика в случае, когда размеры дефекта меньше размеров измерительной катушки. Для повышения измерительных возможностей метода необходимо уменьшение размеров индукционной катушки магнитного преобразователя и уменьшение зазора между ним и поверхностью трубы.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» и является составной частью прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) «Прикладные научные исследования по созданию нового бесконтактного магнитного метода неразрушающего контроля трубопроводов с переменным намагничиванием металла и экспериментальная разработка на базе данного метода опытного образца контрольно-измерительного внутритрубного робототехнического комплекса, обеспечивающего решение проблемы своевременной диагностики коррозионных повреждений подземных трубопроводов тепловых сетей малых диаметров (Ду200, Ду400) без их вскрытия в сфере энергетики и ЖКХ» (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58114X0004).

Литература

1. Потапов А. И., Сясько В. А., Соломенчук П. В., Ивкин А. Е., Чертов Д. Н. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 2. Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов. СПб.: Нестор-История, 2015.
2. Raine A., Lugg M. A review of the alternating current field measurement inspection technique // *Sensor Rev.* 1999. V. 19 (3). P. 207—213.
3. Zhijian Ye, Yanhua Sun, Yihua Kang, Donglin Li. An alternating current electric flux leakage testing methodology and experimental research for metallic materials // *NDT&E International*. 2014. V. 67. P. 36—45.
4. Nicholson G. L., Kostyryzhov A. G., Hao X. J., Davis C. L. Modelling and experimental measurements of idealised and light-moderate RCF cracks in rails using an ACFM sensor // *NDT&E International*. 2011. V. 44. P. 427—437.
5. Маннинен С. Л., Кузнецов С. Л. Создание трёхмерной модели намагниченного участка трубопровода для внутритрубной магнитной дефектоскопии // *Измерительная техника*. 2016. № 8. С. 52—54.

Дата принятия: 18.01.2017.