

Моделирование намагниченного участка трубопровода для  
внутритрубной магнитной дефектоскопии методом конечных  
элементов.

Finite element modeling of the magnetized pipeline part for intratubal  
magnetic defectoscope

*Аннотация:* Разработаны двухмерные и трехмерные компьютерные модели намагниченного участка трубопровода с использованием метода конечных элементов в программах ELCUT и COMSOL. Разработанные модели позволяют производить расчет распределения магнитного поля внутри трубы при протекании через нее переменного электрического тока. Проведено сравнение результатов расчета с реальными измерительными данными. Разработанные расчетные модели согласуются с результатами эксперимента и могут быть использованы для создания эффективной измерительной системы внутритрубного магнитного дефектоскопа.

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

*Abstract:* 3D and 2D computer model of the magnetized part of the pipeline was developed using the finite element method. The model allows to calculate the magnetic field distribution inside the tube while flowing through it an alternating electrical current. The comparison of the calculated results with actual measurement data was carried out. The developed calculation model is consistent with experimental results and can be used to create an effective measurement system for intratubal magnetic defectoscope.

**Key words:** finite element method, intratubal magnetic defectoscopy, pipeline corrosion damage.

За последнее время методы магнитной дефектоскопии получили широкое распространение в связи со значительным развитием измерительной и компьютерной техники [1]. Первичные индукционные, феррозондовые и другие преобразователи магнитного поля встраиваются в сложнейшие измерительные системы, позволяющие регистрировать и обрабатывать сигналы в режиме реального времени [2].

В основе методов магнитной дефектоскопии лежит намагничивание ферромагнитных объектов и измерение на поверхности поля рассеяния от дефекта [3, 4, 5]. Если в результате измерений построить карту распределения поля рассеяния, то по виду распределения можно определить характер дефекта и его расположение.

Одним из перспективных направлений применения данного подхода является диагностика трубопроводов, внутри которых необходимо проводить выявление и оценку различного рода повреждений, в том числе коррозионных. Суть метода в данном случае заключается в намагничивании участка трубы протекающим по ней переменным током. При таком способе намагничивания, магнитное поле внутри однородной неповрежденной трубы не возникает. Однако в случае наличия механического повреждения на внешней или внутренней поверхности трубы, в районе дефекта появляется нескомпенсированное магнитное поле внутри трубы. Измеряя величину магнитного поля вдоль внутренней поверхности трубы, можно обнаружить наличие дефекта, а по высоте и ширине магнитного пика – оценить поперечные размеры и глубину дефекта. Использование в данном методе переменного тока позволяет исключить влияние постоянного геомагнитного поля и остаточной намагниченности участка трубы. Однако частота намагничивающего тока

не должна быть слишком большой из-за возрастания негативного влияния скин-эффекта.

В связи с тем, что при измерении распределения поля рассеяния могут возникать различного рода помехи, в первую очередь представляется целесообразным создание компьютерной модели данного метода, с последующим сравнением с результатами измерений на реальных объектах. Таким образом, цель данной работы заключается в создании компьютерной модели намагниченного участка трубопровода, позволяющей производить расчет распределения магнитного поля внутри трубы при протекании через нее переменного электрического тока. Создание такой модели необходимо для определения границ применимости метода внутритрубной магнитной дефектоскопии, а также для отладки программного обеспечения, выполняющего анализ измерительных данных при обнаружении дефектов.

#### *Описание компьютерной модели*

Трехмерная компьютерная модель намагниченного участка трубопровода была создана с использованием метода конечных элементов в интерактивной среде COMSOL Multiphysics. Расчетная область модели включает участок цилиндрической трубы с дефектом, внутреннюю воздушную полость и часть внешней воздушной области. Намагничивающий переменный ток протекает по стенке трубы и направлен вдоль ее оси. Задача решается в линейном приближении, магнитная проницаемость материала трубы задается постоянным числом. Результатом расчета является распределение величины индукции магнитного поля на контрольной цилиндрической поверхности, расположенной внутри трубы на заданном расстоянии от ее внутренней поверхности.

Расчетная область разбивается с помощью тетраэдральной сетки на отдельные подобласти (элементы) (см. рис. 1), внутри которых все

электромагнитные характеристики материала считаются постоянными. Векторный магнитный потенциал аппроксимируется дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Решение уравнений поля определяется исходя из условия минимума энергетического функционала или ортогональности невязки уравнений поля и интерполяционных функций конечных элементов [6, 7].

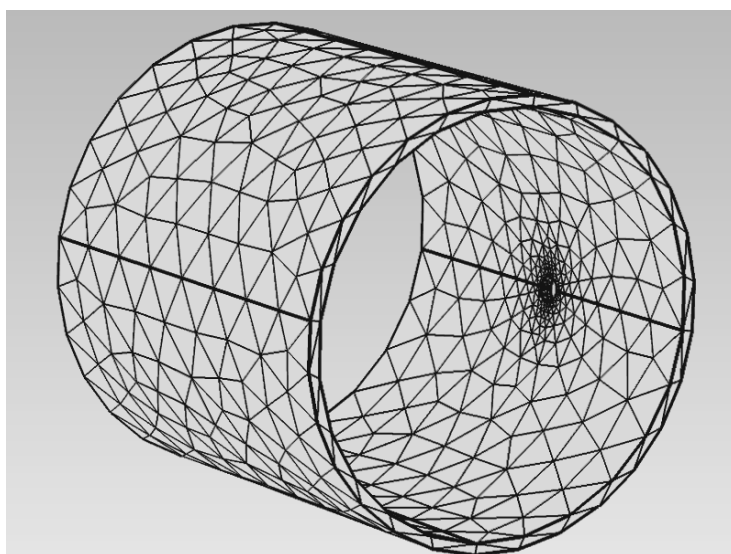


Рис 1. Пример построения сетки конечных элементов.

Разработанная компьютерная модель полностью параметризована и позволяет задавать и изменять следующие параметры: наружный диаметр, толщину стенки и длину участка трубы, диаметр, глубину, линейную и угловую координаты дефекта, частоту и силу намагничивающего тока, зазор между датчиком и поверхностью трубы, относительную магнитную проницаемость материала трубы. Для построения и параметризации модели, а также для обработки и представления результатов расчета используется язык пакета MATLAB. Результаты расчета экспортируются в рабочую среду MATLAB для дальнейшей обработки и сохраняются в текстовом файле в виде таблицы, номер столбца которой соответствует угловой координате точки на контрольной поверхности, а номер строки – ее линейной координате.

### *Сравнение результатов расчета и эксперимента.*

Для проверки применимости разработанной расчетной модели были выполнены расчеты и измерения распределения магнитного поля вблизи контрольного дефекта. С помощью расчетной модели был смоделирован участок трубы длиной 500 мм, внутренним диаметром 1000 мм, с толщиной стенки 10 мм. На поверхности трубы был задан контрольный дефект в виде сквозного отверстия диаметром 15 мм

Для данного участка трубы с дефектом было рассчитано распределение индукции магнитного поля внутри трубы. На основании результатов расчета была получена двумерная магнитограмма – зависимость тангенциальной компоненты (направленной вдоль касательной к направляющей окружности цилиндра) индукции магнитного поля от угловой и линейной (вдоль оси цилиндра) координат (см. рис. 2).

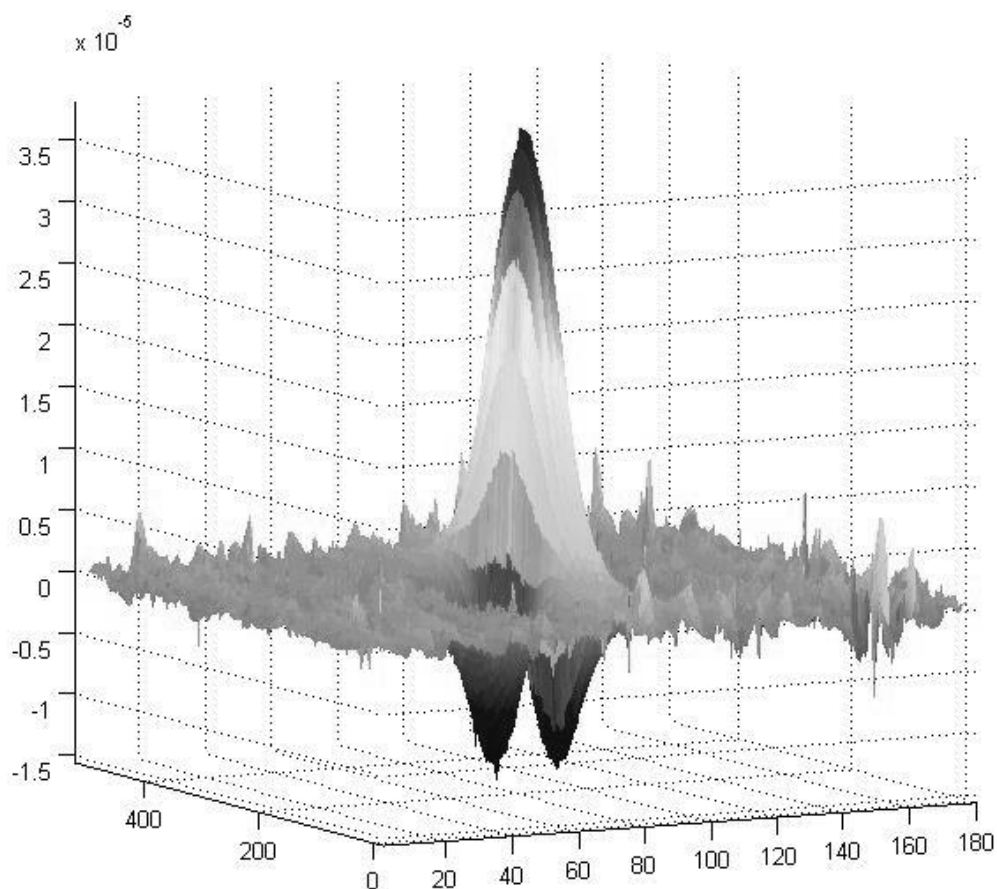


Рис. 2. Расчетная магнитограмма контрольного дефекта.

Проверка применимости разработанной численной модели проводилась на основе экспериментальных данных, полученных на измерительной установке Университета ИТМО. Схема измерительной установки представлена на рисунке 3. Она состоит из отрезка трубы длиной 9000 мм, диаметром 1000 мм и толщиной стенки 10 мм. Через отрезок трубы пропускался переменный ток частотой 300 Гц и амплитудой 100 А. Магнитное поле внутри трубы измерялось с помощью индукционного датчика, представляющего собой катушку диаметром 11 мм и высотой 9 мм, расположенную параллельно касательной к направляющей окружности цилиндра. Центр катушки располагается на расстоянии 20 мм от внутренней поверхности трубы (см. рис. 3).

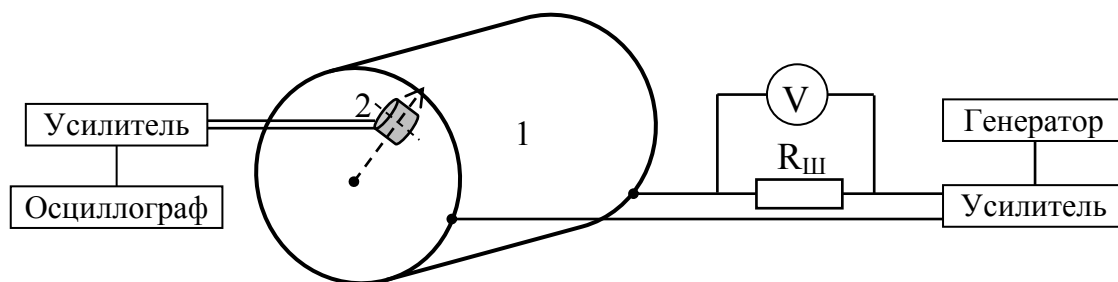


Рис. 3. Схема измерительной установки.

1 – участок трубы; 2 – измерительная катушка.

Для сравнения результатов расчета и эксперимента были построены угловые срезы экспериментальной и расчетной магнитограмм вдоль дуги направляющей окружности цилиндра, проходящей через центр дефекта. На рисунке 4 показана зависимость величины расчетного поля и амплитуды измеренного сигнала от координаты на угловом срезе. Поскольку используемый для получения экспериментальных данных индукционный преобразователь не был откалиброван на реальное значение индукции магнитного поля, для сопоставления между собой расчетная и экспериментальная кривые нормализованы на единицу по максимальному пиковому значению.

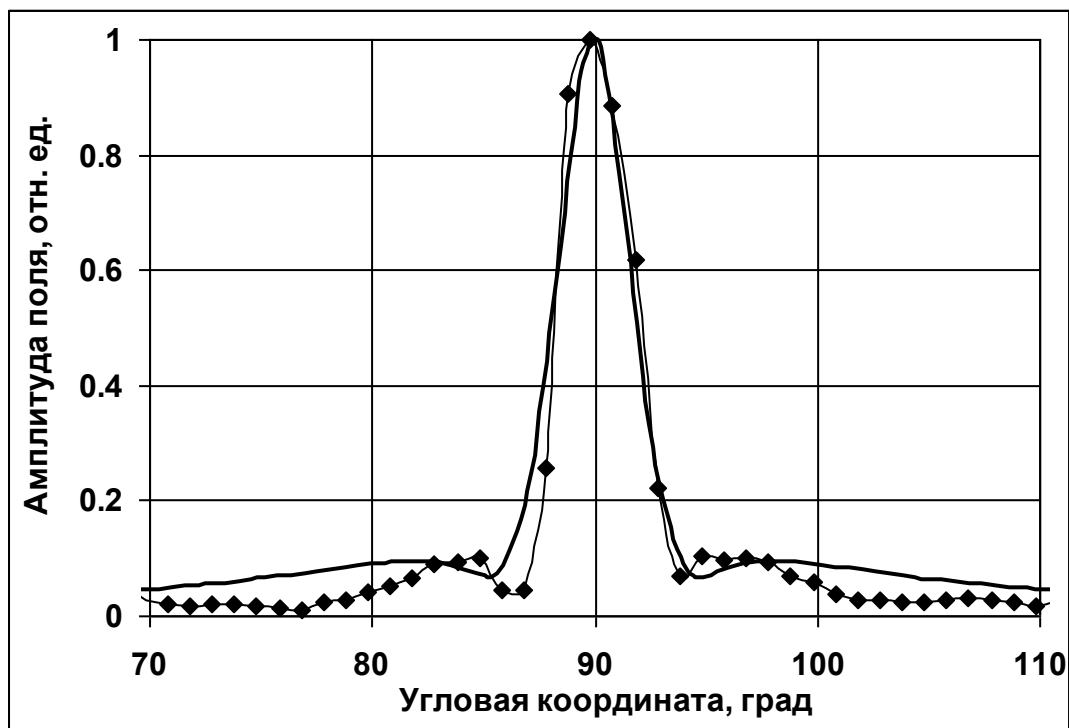


Рис. 4. Нормализованные угловые срезы расчетной (толстая линия) и экспериментальной (ромбики) магнитограмм вдоль дуги, проходящей через центр дефекта

Как видно из графиков рисунка 4, 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 ноль измеряемой (и расчетной) компоненты данного вектора.

#### *Заключение*

Таким образом, разработанная модель намагниченного участка трубопровода позволяет получить адекватное действительности распределение магнитного поля внутри трубы. 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. Данная расчетная модель может быть использована для создания эффективной измерительной системы внутритрубного магнитного дефектоскопа и разработки алгоритмов обнаружения и распознавания дефектов для внутритрубной магнитной дефектоскопии с переменным намагничиванием.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки, уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок RFMEFI58114X0004.

### *Литература*

1. Дубов А.А. Диагностика трубопроводов, оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла. Сборник статей и докладов // М.: Энергодиагностика, 1999, 200 с.
2. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль // Наука и практика, 2011, №2, с.48-63
3. Синев А.И., Морозов А.К. Дефектоскопия магистральных трубопроводов на современном уровне // Сфера Нефтегаз, 2010, №2, с. 172-173
4. Воробьев Я.В., Волгина Н.И., Хуснутдинов Л.А., Камаева С.С., Технология металлов, 2010, №1, с.46-49
5. Абакумов А.А. Абакумов А.А. мл. Магнитные интроскопы и технология диагностирования коммунальных трубопроводов. // Энергосбережение, 2004, №1
6. Зинкевич О. Метод конечных элементов в технике. // М.: Мир, 1975, 115 с.
7. Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высш. шк., 1986, 240 с.



*Сведения об авторах*

Маннинен Сергей Анатольевич

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Рабочий адрес: 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д.49

Ученая степень, звание: нет

Должность: ведущий инженер

Электронная почта: crism@mail.ru

SPIN-код:

Кузнецов Павел Алексеевич

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Рабочий адрес: 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д.49

Ученая степень, звание: д.т.н.

Должность: начальник отдела

Электронная почта: crism@mail.ru

SPIN-код:

Manninen Sergey Anatolievich

NRC «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey»

Postal address: 49, Shpalernaya St., St. Petersburg, 191015, Russia

Kuznetsov Pavel Alekseevich

NRC «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey»

Postal address: 49, Shpalernaya St., St. Petersburg, 191015, Russia