

УДК 612

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ВЫБОРА ЕГО ПАРАМЕТРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ

А. С. КРЮКОВ, В. В. ЧЕГОДАЕВ, Н. П. КОДАК, В. П. ЛУНИН

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 612

THE RESEARCH OF THE NUMERICAL MODEL OF THE EDDY CURRENT PROBE WHEN MONITORING ZIRCONIC PIPES

A. S. KRYUKOV, V. V. CHEGODAEV, N. P. KODAK, V. P. LUNIN

Аннотация

Представлены результаты исследования численной модели вихретокового преобразователя (ВТП) с целью выбора его параметров при контроле циркониевых труб. В результате математического моделирования был спроектирован многоэлементный ВТП и подобраны условия вихретокового контроля. Получены сигналы от дефектов с различными геометрическими параметрами, анализ которых показал, что для регистрации наличия несплошностей необходимо использовать фазовый метод обработки вихретоковых данных.

Ключевые слова:

вихретоковый контроль, многоэлементный преобразователь, математическое моделирование, контроль труб.

Abstract

The exploration of a numerical model of the eddy current probe with the purpose of selecting its parameters in the control of zirconium pipes are represented in the article. As a result of mathematical modeling, a multi-element eddy current probe was constructed and the conditions for eddy current monitoring were chosen. Signals were received from defects with various geometric parameters. Its analysis was showed that it takes to use the phase method for processing eddy current data in order to detect the presence of the defects.

Key words:

eddy current control, multielement probe, mathematical modeling, pipe control.

Объектом контроля (ОК) в исследовании является оболочка теплоделяющего элемента (твэла) [1], представляющая собой циркониевую трубку (рис. 1) с внешним диаметром $D_{внеш} = 9$ мм и внутренним диаметром $D_{внутр} = 8$ мм. Удельная электрическая проводимость циркония $\sigma = 2,44$ МСм/м.

В процессе изготовления в оболочке твэла могут возникать дефекты, приводящие к нарушению нормальной работы. Такие дефекты необходимо выявлять и локализовать на этапе производства. Для этого целесообразно

применять вихретоковый метод неразрушающего контроля (ВТК). Его преимуществами являются: высокая производительность, бесконтактность и высокая чувствительность [2].

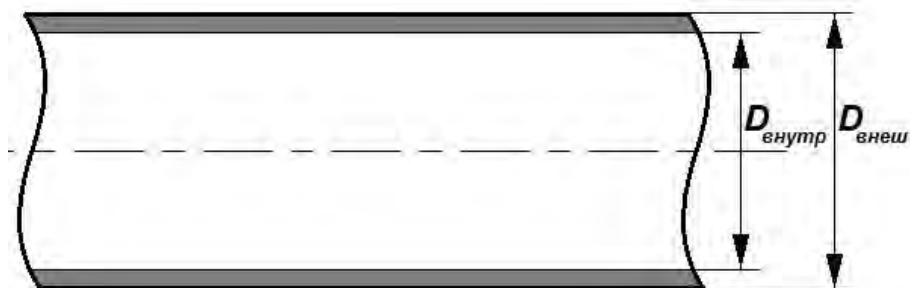


Рис. 1. Объект контроля – оболочка тепловыделяющего элемента

Для выявления дефектов, оценки их формы и объема целесообразно использование многоэлементного накладного преобразователя (МНП), состоящего из нескольких одноэлементных накладных преобразователей (НВП). Использование НВП позволяет сконцентрировать вихревые токи на небольшой площади поверхности ОК. Он сохраняет основные достоинства вращающегося преобразователя и при этом устраняет его недостатки [3].

Математическая модель вихретокового контроля строилась в программном пакете *Comsol Multiphysics* с помощью метода конечных элементов [4]. В модели учитывалось мультиплексирование преобразователей, т. е. было достаточно изучить взаимодействие только одного элемента МНП с ОК. Это позволило улучшить точность расчета при неизменном его времени.

Имеющийся стандартный образец предприятия (СОП) содержал контрольные дефекты, выполненные в виде сквозного радиального отверстия диаметром 0,15 мм (КД1) и в виде глухого радиального отверстия диаметром 0,15 мм и глубиной 0,2 мм (КД2). Для уменьшения влияния на сигнал физических и геометрических свойств ОК, а также условий окружающей среды, было решено использовать две катушки, включенные в мостовую схему.

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе была построена модель абсолютного накладного преобразователя (НВП), с помощью которой были рассчитаны рабочая частота ВТК, диаметр ферритового сердечника и исследовано влияние зазора на величину сигналов от дефектов. На втором этапе была построена модель преобразователя, состоящего из двух катушек, рассчитаны база преобразователя и количество элементов МНП, получены сигналы от дефектов с реальными геометрическими размерами.

На рис. 2 изображена геометрия модели, содержащей абсолютный НВП. Модель имеет симметрию, поэтому для уменьшения количества

конечных элементов и времени расчета была построена только ее половина. В среднем модель состоит из 200000 конечных элементов.

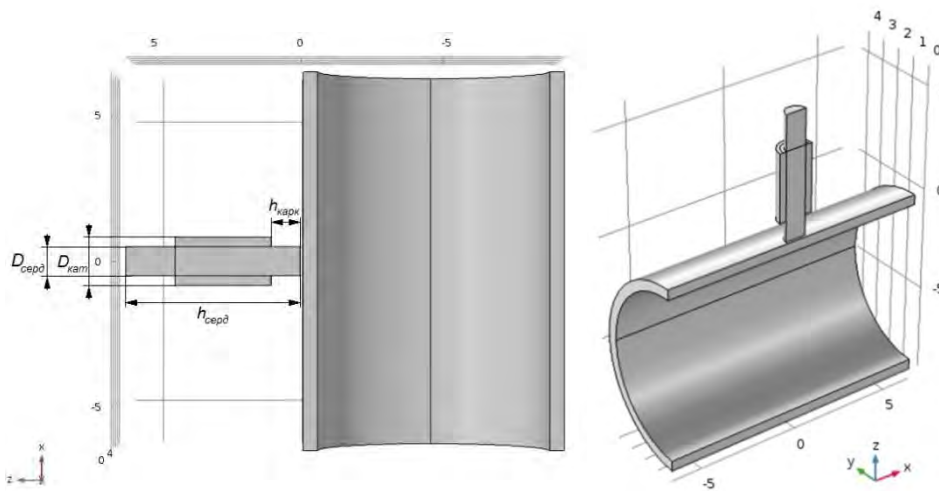


Рис. 2. Геометрия модели абсолютного НВТП

Эффективная глубина проникновения вихревых токов (ВТ) в ОК определяется физическими параметрами ОК: электрическая проводимость, магнитная проницаемость и геометрические параметры [2]. Были получены распределения вихревых токов в ОК при следующих значениях частоты возбуждающего тока: $f = (200, 400, \dots, 2000)$ кГц. На рис. 3 видно, что при частотах, превышающих частоту 1200 кГц, глубина проникновения меньше толщины стенки ОК. Для того, чтобы ВТ охватили толщину стенки оболочки твэла, в качестве рабочей была выбрана частота 1200 кГц.

Для расчета $D_{серд}$ были получены сигналы от дефекта КД2 при его перемещении вдоль оси X под НВТП для четырех значений $D_{серд} = (0,5; 0,7; 1; 1,5)$ мм.

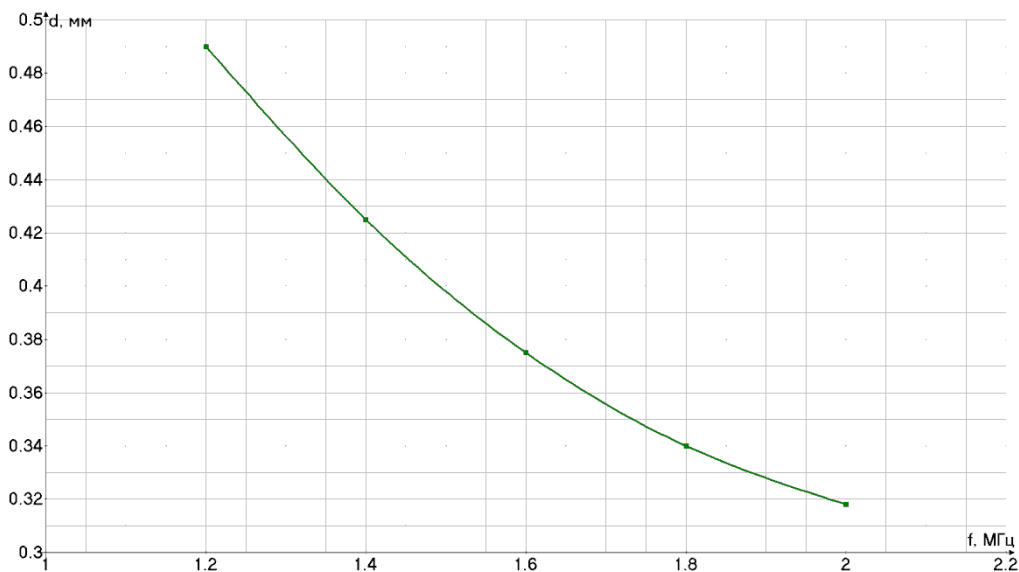


Рис. 3. Зависимость эффективной глубины проникновения от частоты возбуждающего тока

Было выявлено, что $D_{серд} = 1$ мм обеспечивает максимальное вносимое дефектом напряжение и среднюю величину провала p , вызванное отсутствием ВТ непосредственно под сердечником (рис. 4). При $X = 0$ дефект располагается под НВТП.

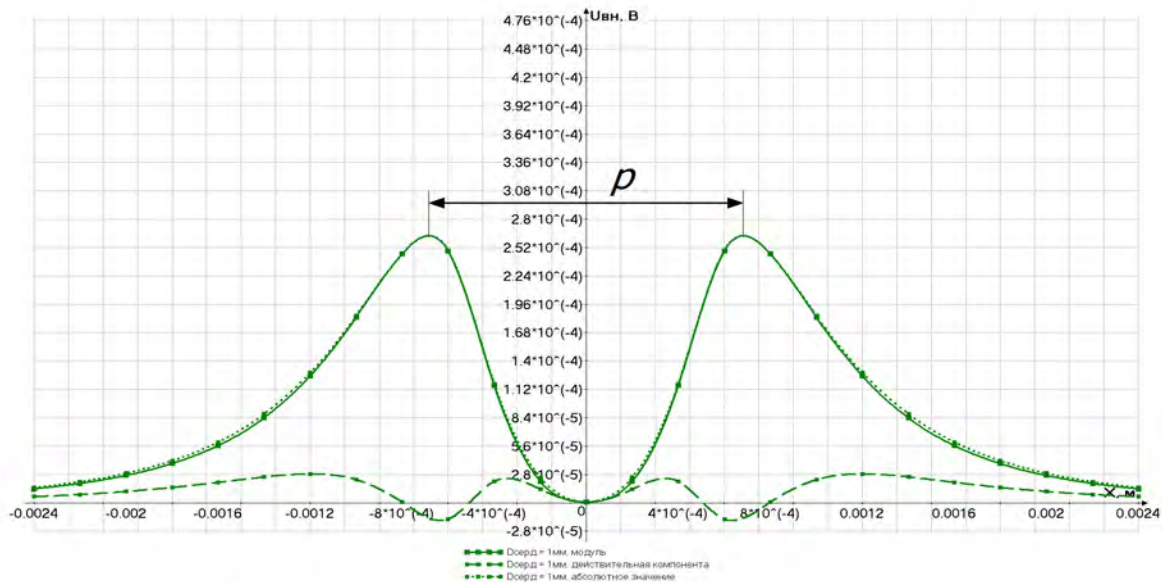


Рис. 4. Сигнал от дефекта КД2 при $D_{серд} = 1$ мм

При использовании НВТП в процессе вихретокового контроля одним из основных мешающих факторов является непостоянство величины воздушного зазора между НВТП и поверхностью ОК. С этой целью были получены сигналы от дефекта КД2 при 5 различных величинах воздушного зазора: (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4) мм.

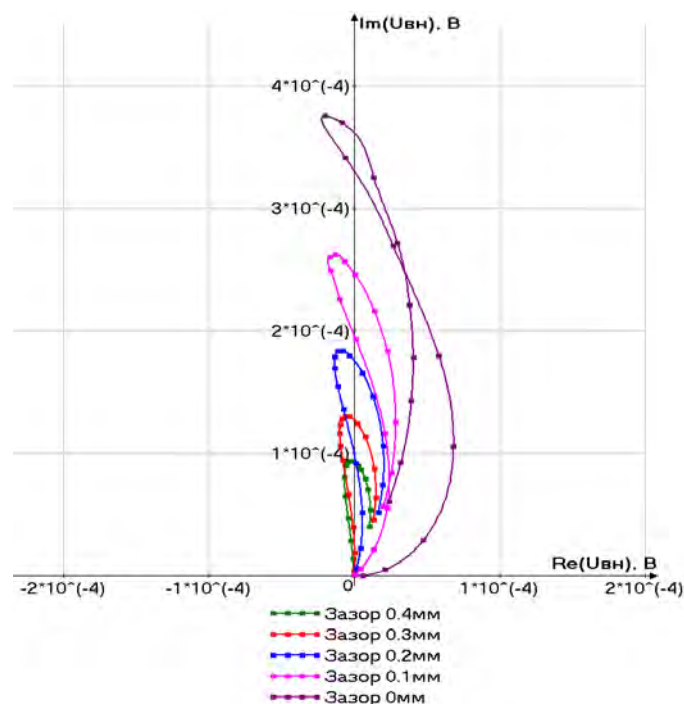


Рис. 5. Годографы сигналов для всех значений зазоров

На рис. 5 изображены годографы полученных сигналов для всех значений зазоров. Основными информативными параметрами годографов сигналов являются: угол наклона годографа и амплитуда годографа.

Из рис. 6 видно, что при меньших значениях зазора влияние его изменения на сигнал сильнее, чем при больших значениях зазора. Но с увеличением воздушного зазора резко уменьшается амплитуда сигнала. Учитывая конструктивные требования при изготовлении НВТП, для расчетов величина воздушного зазора была принята равной 0,1 мм.

Для уменьшения влияния на информативный сигнал медленно изменяющихся вдоль оси физических и геометрических свойств ОК, условий окружающей среды, целесообразно использовать НВТП, состоящий из двух катушек, включенных в мостовую схему.

Для такой схемы включения важным параметром является база ВТП (b) – расстояние между осями ферритовых сердечников катушек. Для определения базы НВТП были получены сигналы от дефекта КД2 для значений $b = (2, 3, 4)$ мм, анализ которых показал, что при $b = 2$ мм влияние катушек друг на друга слишком велико, а при $b = 4$ оно полностью отсутствует. Поэтому значение базы для НВТП было выбрано равным 3 мм.

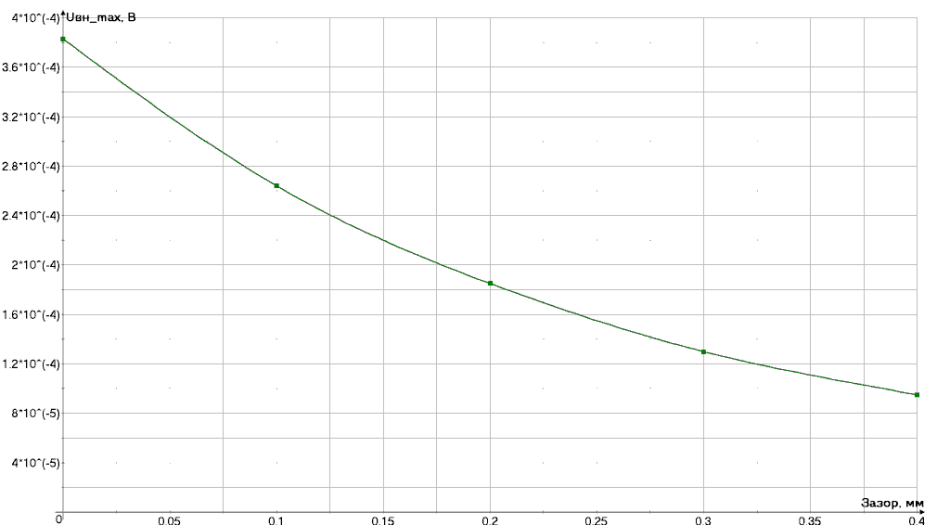


Рис. 6. Зависимость амплитуды годографов от величины воздушного зазора

Полученное значение базы дает возможность рассчитать общее количество дифференциальных НВТП n в составе МНП [3]:

$$n = \frac{\pi D_{внеш}}{b} = 9,4 \approx 10.$$

После расчета НВТП, состоящего из двух катушек, были получены сигналы от дефектов с различными геометрическими параметрами при прохождении дефекта под НВТП. В качестве дефекта использовался прямоугольный параллелепипед длиной l_{def} , шириной w_{def} и глубиной d_{def} . Все используемые значения представлены в табл. 1.



На рис. 7. представлены годографы сигналов от некоторых дефектов.

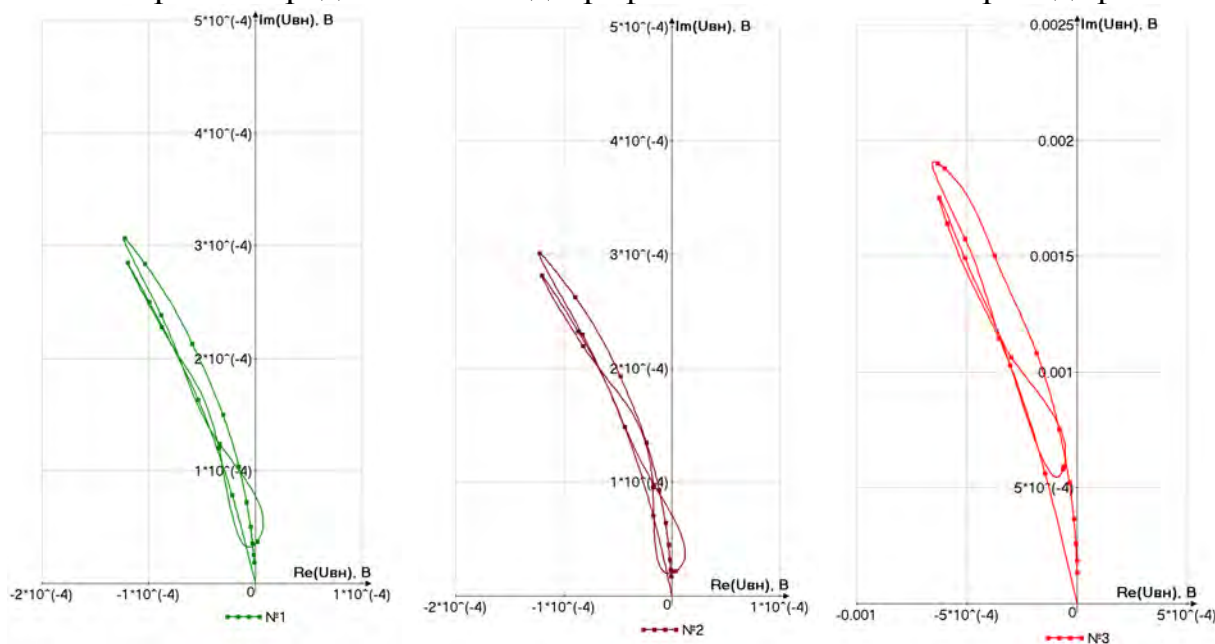


Рис. 7. Годографы сигналов от дефектов № 1, № 2, № 3

В табл. 2 отражены амплитуды и углы наклонов годографов для каждого из дефектов. Разброс углов наклонов годографов составляет $3,7^\circ$, что дает возможность применять фазовый метод определения наличия дефектов.

Табл. 1. Геометрические параметры дефектов

Табл. 2. Амплитуды и углы наклонов годографов для каждого из дефектов

№ де-фекта	l_{def} мм	w_{def} мм	d_{def} мкм	$V, \text{мм}^3$
1	0,60	0,30	24	0,00432
2	0,45	0,27	31	0,00377
3	0,83	0,54	70	0,03137
4	0,49	0,29	40	0,00568
9	0,38	0,36	46	0,00629
10	0,54	0,26	35	0,00491
11	0,56	0,24	46	0,00618
12	1,55	0,57	15	0,01325

№ де-фекта	Угол наклона годографа, $^\circ$	Амплитуда, В
1	111,7	0,000329
2	112,0	0,000324
3	108,3	0,002002
4	111,1	0,000485
9	111,3	0,000529
10	111,1	0,000415
11	110,1	0,000546
12	108,8	0,000482

В результате математического моделирования был спроектирован мноэлементный ВТП, состоящий из 10 элементов, база которых 3 мм, воздушный зазор между МНП и ОК – 0,1 мм, количество витков каждой катушки – 90 (3 слоя по 30), диаметр ферритовых сердечников 1 мм, рабочая частота ВТК – 1,2 МГц.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Самойлов, А. Г.** Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов : учебник для вузов / А. Г. Самойлов, В. С. Волков, М. И. Солонин. – М. : Энергоатомиздат, 1996.

2. **Герасимов, В. Г.** Неразрушающий контроль : 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль : практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М. : Высш. шк., 1992.

3. **Крюков, А. С.** Оценка эффективности вихревых токов при проектировании многоэлементного преобразователя для контроля парогенераторных труб / А. С. Крюков, В. В. Чегодаев, В. П. Лунин // Вестник МЭИ. – 2013. – № 4. – С. 90–94.

4. **Лунин, В. П.** Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / В. П. Лунин. – М., 1996.

E-mail: sasa-mail@inbox.ru
chegodaevvv@gmail.com
valery.lunin@mtu-net.ru
kodak_n@mail.ru