

Министерство образования и науки Российской Федерации



Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор ИШНКБ

\_\_\_\_\_ Баранов П.Ф.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 6  
по дисциплине “Физические основы получения информации”

ТОМСК 2024

## 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Измерительные преобразования в полях вихревых токов основаны на возбуждении в проводящих объектах переменным магнитным полем вихревых токов и зависимости параметров этих токов от свойств объекта. В качестве источника переменного магнитного поля обычно используется обмотка, с переменным током частоты  $\omega$  (ток возбуждения, обмотка возбуждения). Интенсивность, фаза, распределение вихревых токов зависят от геометрических размеров и формы проводящего объекта, электрических и магнитных характеристик материала, его однородности, взаиморасположения объекта и обмотки возбуждения, размеров и формы обмотки возбуждения, частоты и амплитуды тока возбуждения. Благодаря этой зависимости измерительные преобразования в полях вихревых токов могут быть использованы для идентификации геометрических и электромагнитных параметров локальных проводящих объектов, толщинометрии, структуроскопии, дефектоскопии, измерения перемещений проводящих объектов.

Информацию о параметрах вихревых токов получают путем измерения параметров их поля с помощью отдельной измерительной обмотки (индукционное, трансформаторное, взаимоиндуктивное преобразование) или с помощью той же обмотки, которой возбуждается переменное магнитное поле (индуктивное, параметрическое преобразование). Напряжение и сопротивление обмотки в отсутствие проводящего объекта называются соответственно начальным напряжением  $\dot{U}_0$  и начальным сопротивлением  $\dot{Z}_0$ .

Если вести отсчет сдвига фаз от фазы тока возбуждения, то для идеальных и большинства реальных обмоток можно принять, что начальные напряжения и сопротивления имеют только мнимые составляющие:  $\dot{U}_0 = jU_0$ ;  $\dot{Z}_0 = j\omega L_0$ . Присутствие в переменном магнитном поле проводящего объекта вызывает появление в последнем вихревых токов, магнитное поле которых обуславливает изменение напряжения и сопротивления обмотки на величины  $\dot{U}_{вн}$  и  $\dot{Z}_{вн}$ , называемые вносимыми напряжением и сопротивлением. Именно параметры комплексных  $\dot{U}_{вн}$  и  $\dot{Z}_{вн}$  (активная и реактивная составляющие или амплитуда и фаза) являются информативными параметрами, в которые преобразуются геометрические и электромагнитные параметры проводящего объекта.

Для того, чтобы на результаты преобразования не влияла интенсивность возбуждающего поля (ток возбуждения)  $\dot{U}_{вн}$  и  $\dot{Z}_{вн}$  нормируют по  $U_0$  и  $\omega L_0$ :

$$\dot{U}_{вн}^* = \frac{\text{Re}\dot{U}_{вн}}{U_0} + j \frac{\text{Im}\dot{U}_{вн}}{U_0}; \quad \dot{Z}_{вн}^* = \frac{R_{вн}}{\omega L_0} + j \frac{L_{вн}}{L_0}, \quad (1)$$

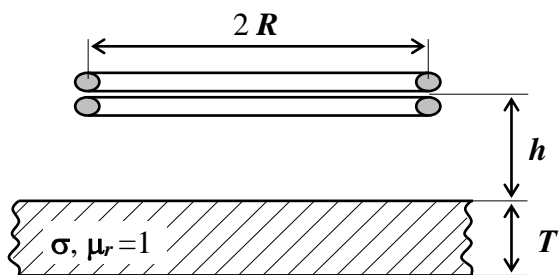
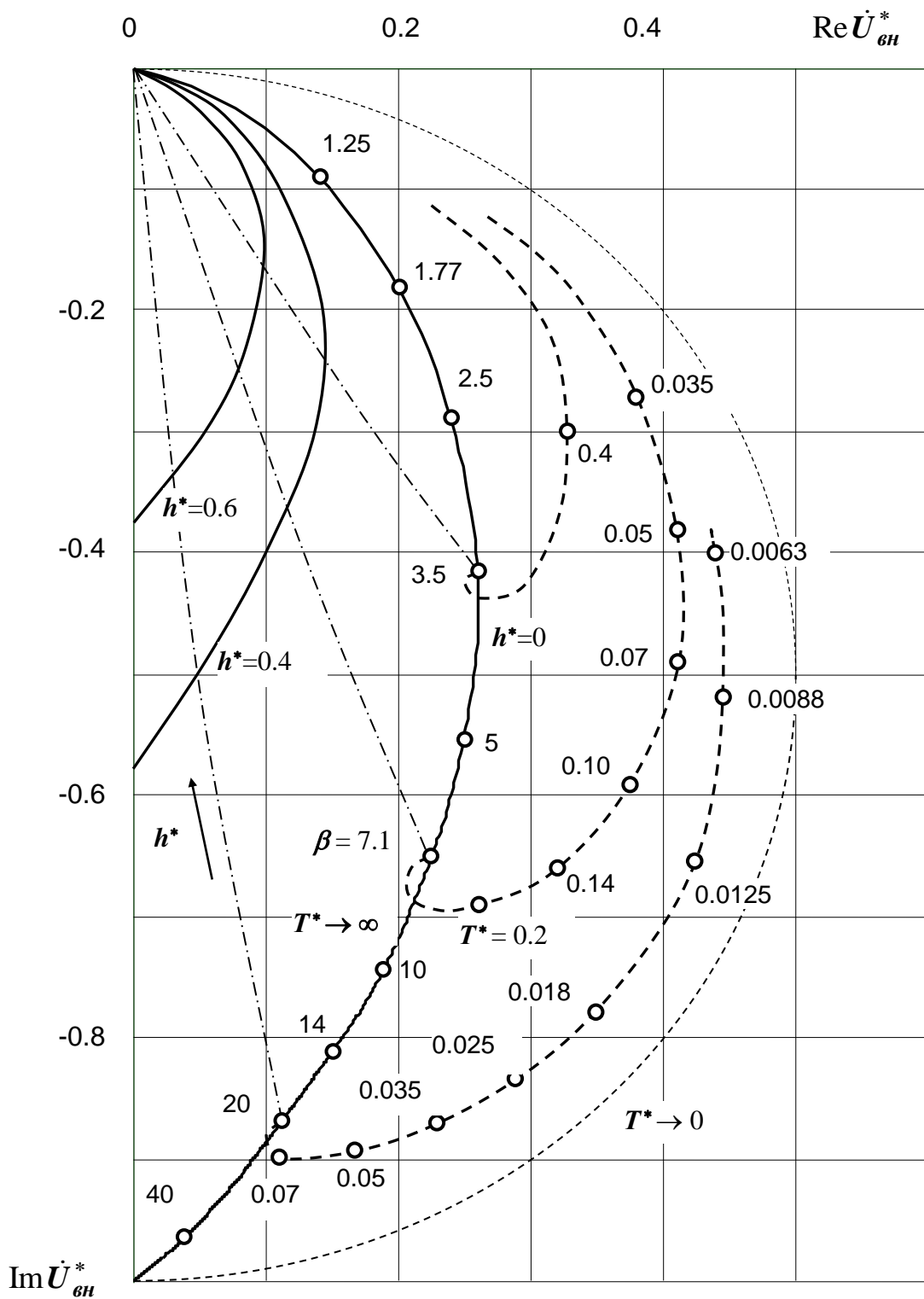


Рис. 1. Годографы относительного вносимого напряжения вихретокового преобразователя с немагнитной электропроводящей пластиной:  $h^* = h/R$ ;  $T^* = T/R$ ;  $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$ .

где  $\dot{U}_{вн}^*$  и  $\dot{Z}_{вн}^*$  - относительные вносимые напряжение и сопротивление.

При этом  $\text{Re}\dot{U}_{вн}^* = R_{вн}^*$ ;  $\text{Im}\dot{U}_{вн}^* = L_{вн}^*$ . В дальнейшем будем оперировать составляющими относительного комплексного вносимого напряжения. Их зависимость от геометрических и электромагнитных параметров проводящего объекта наиболее удобно представить с помощью годографов. Годограф относительного вносимого напряжения - линия на комплексной плоскости, вычерчиваемая концом вектора  $\dot{U}_{вн}^*$  при изменении какого-либо геометрического или электромагнитного параметра проводящего объекта, либо частоты тока возбуждения. Параметры проводящего объекта или функции, оказывающие одинаковое влияние на  $\dot{U}_{вн}^*$  объединяют в обобщенный параметр. В качестве такого обобщенного параметра в работе будем использовать  $\beta = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$ , где  $R$  - радиус обмотки возбуждения;  $\sigma$  - удельная электрическая проводимость материала;  $\mu_0$  - магнитная постоянная. На рис. 1 показан годограф относительного вносимого напряжения трансформаторного вихретокового преобразователя, расположенного над немагнитной пластиной, от изменения обобщенного параметра  $\beta$ , расстояния от обмоток до проводящего объекта  $h$ , толщины пластины  $T$ .

## 2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 2.1. Какими параметрами проводящей пластины определяются составляющие вносимого напряжения?
- 2.2. Какими физическими параметрами определяется глубина проникновения электромагнитного поля в проводящий объект?
- 2.3. Какова форма контуров вихревых токов в проводящем объекте?
- 2.4. В чем отличие годографов вносимого напряжения для ферромагнитных и немагнитных объектов?
- 2.5. На какой параметр  $\dot{U}_{вн}^*$  главным образом влияет изменение расстояния от обмоток до проводящего объекта?
- 2.6. Какова фаза  $\dot{U}_{вн}^*$  при  $\sigma \rightarrow \infty$  или  $\omega \rightarrow \infty$  ?
- 2.7. На какой частоте наиболее велико влияние на составляющие  $\dot{U}_{вн}^*$  толщины проводящей пластины?

## 3. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с физическими основами измерительных преобразований в поле вихревых токов. Определить экспериментально годографы относительного вносимого напряжения трансформаторного вихретокового преобразователя, расположенного над электропроводящей пластиной от изменения различных параметров пластины.

## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Определить зависимость амплитуды и фазы относительного вносимого напряжения от расстояния между обмотками и проводящей пластиной для случаев ферромагнитной и немагнитной пластин. Построить годографы относительного вносимого напряжения от изменения указанного параметра.

4.2. Определить зависимости амплитуды и фазы относительного вносимого напряжения от толщины немагнитной проводящей пластины. Построить годограф относительного вносимого напряжения от изменения указанного параметра.

4.3. Определить зависимость амплитуды и фазы относительного вносимого напряжения от удельной электрической проводимости проводящей немагнитной пластины. Построить годограф относительного вносимого напряжения от изменения указанного параметра.

4.4. Определить зависимость амплитуды и фазы относительного вносимого напряжения от перемещения вихретокового преобразователя над дефектом сплошности при различных глубинах его залегания.

## 5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

В качестве проводящих объектов в данной работе используется набор пластинок из различных магнитных и немагнитных металлов. Изменение зазора между обмотками и проводящими пластинками осуществляется с помощью набора из непроводящих (стеклотекстолитовых) пластинок.

Обмотка возбуждения и измерительная обмотки конструктивно объединены в блок (блок обмоток), залитый эпоксидным компаундом. При проведении всех экспериментов следует следить, чтобы блок обмоток устанавливался в центре проводящих пластинок.

Для исследования измерительных преобразований используется схема рис. 2.

Измерение квадратурных составляющих вносимого и начального напряжений осуществляется с помощью блока амплитудно-фазового детектирования (АФД), внешний вид которого показан на рис. 3. Переменное синусоидальное напряжение подается в схему через гнезда блока АФД “Подключение генератора” с коммутационно-измерительной панели (выход “ $U_{2\sim}$ ”).

Питание электронной схемы блока АФД осуществляется через кабель питания с разъема КИП “Внешнее устройство”. Для исключения из сигнала измерительной обмотки его неинформативной составляющей - начального напряжения предусмотрены следующие конструктивные и схемотехнические меры. В блоке обмоток кроме обмотки возбуждения  $w_1$  и измерительной  $w_2$  имеется дополнительная компенсирующая обмотка  $w'_2$ , идентичная  $w_2$  и расположенная симметрично относительно  $w_1$  (рис.4).

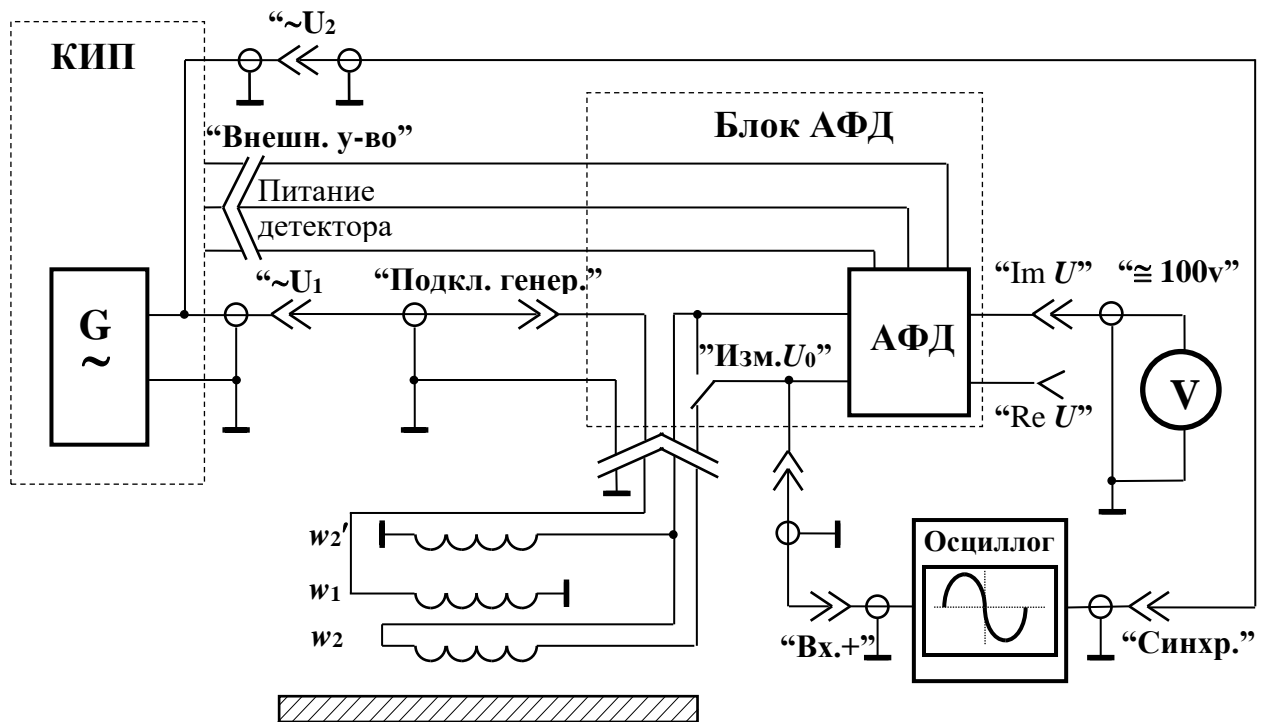


Рис. 2. Схема измерительной установки для исследования измерительных преобразований в полях вихревых токов:  $w_1$ -обмотка возбуждения;  $w_2$  - измерительная обмотка;  $w_2'$  - компенсационная обмотка;  $V$  - вольтметр; **КИП**- коммутационно-измерительная панель;  $G$  - источник переменного напряжения; **АФД** - амплитудно-фазовый детектор.

Обмотки  $w_2$  и  $w_2'$  включены последовательно встречено, их суммарное начальное напряжение равно нулю. Наличие проводящего объекта вызывает появление вносимого напряжения измерительной обмотки и практически не изменяет сигнала компенсирующей обмотки, расположенной значительно дальше от объекта. Поэтому можно считать, что суммарное напряжение обмоток  $w_2$  и  $w_2'$  равно вносимому напряжению  $\dot{U}_{\text{вн}}$  измерительной обмотки. Этот сигнал подается на вход блока АФД, выходными сигналами которого являются постоянные напряжения, равные амплитудам действительной  $\text{Re}\dot{U}_{\text{вн}}$  и мнимой  $\text{Im}\dot{U}_{\text{вн}}$  составляющих вносимого напряжения (гнезда “ReU” и “ImU”). Опорным сигналом АФД является напряжение компенсирующей обмотки  $\dot{U}_k$ , противофазное начальному напряжению  $\dot{U}_0$ .

Измерение амплитуды  $\dot{U}_0$  осуществляется путем нажатия кнопки “Изм. $U_0$ ” на лицевой панели блока АФД. При этом на вход АФД согласно схеме рис. 2 подается  $\dot{U}_k = -\dot{U}_0$ . Следует обратить внимание на то, что это напряжение имеет только мнимую составляющую  $\text{Im}\dot{U}_k = -U_0$ .



Рис. 3. Внешний вид блока амплитудно-фазового детектора.

Блок АФД непосредственно предназначен для детектирования сигналов частоты 4 кГц. Изменение рабочей частоты блока производится подключением к его гнездам “С” соответствующего конденсатора.

Входной сигнал схемы АФД  $\dot{U}_{вн}$  или  $\dot{U}_к$  (в зависимости от положения кнопки “Изм.  $U_0$ ”), выведенный на гнезда лицевой панели блока “ $U_x$ ”, подается на вход осциллографа, работающего в режиме внешней синхронизации развертки. Опорный сигнал синхронизации подается на осциллограф с выхода “ $U_{2\sim}$ ” КИП. Измерение  $\text{Re}\dot{U}_{вн}$  и  $\text{Im}\dot{U}_{вн}$  производится с помощью цифрового мультиметра.

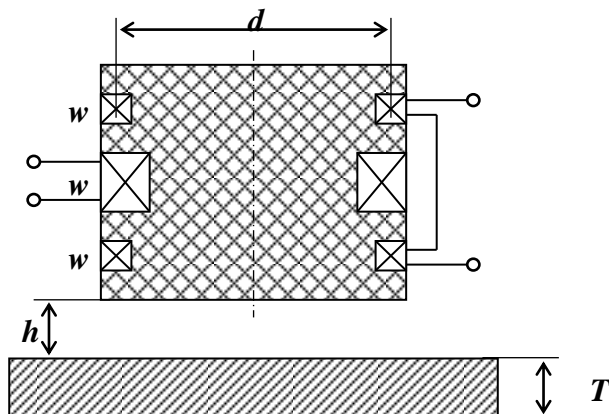


Рис. 4. Конструкция вихретокового преобразователя.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1. При определении зависимостей амплитуды и фазы  $\dot{U}_{вн}$  от расстояния  $h$  между блоком обмоток и проводящей пластиной и при построении годографа  $\dot{U}_{вн}$  от изменения  $h$ , значения  $h$  задаются в диапазоне от 0 до 10 мм с помощью набора стеклотекстолитовых пластинок толщиной 0,8мм. Для каждого значения  $h$  измеряются значения  $\text{Re}\dot{U}_{вн}$  и  $\text{Im}\dot{U}_{вн}$ . Нормирующее значение  $U_0$  определяется при отсутствии пластины путем нажатия кнопки “Изм.  $U_0$ ” блока АФД. Далее вычисляются значения  $\text{Re}\dot{U}_{вн}^*$  и  $\text{Im}\dot{U}_{вн}^*$ , амплитуды  $U_{вн}^*$  и фазы  $\varphi$  относительного вносимого напряжения, строятся зависимости  $U_{вн}^*(h)$ ,  $\varphi(h)$ , годограф  $U_{вн}^*$  от изменения  $h$ .

6.2. При определении зависимостей амплитуды и фазы  $U_{вн}^*$  от толщины  $T$  проводящей пластины и при построении годографа  $U_{вн}^*$  от изменения толщины  $T$ , значения  $T$  задаются в диапазоне от 1 до 6 мм с помощью набора немагнитных (дюралевых) пластинок толщиной 1 мм. Значение зазора  $h$  между блоком обмоток и проводящей пластиной устанавливается равным нулю. Измерения проводятся по методике, описанной в разделе 6.1. Строятся зависимости  $U_{вн}^*(T)$ ,  $\varphi(T)$ , годограф  $U_{вн}^*$  от изменения  $T$ .

6.3. При определении зависимостей амплитуды и фазы  $U_{вн}^*$  от удельной электрической проводимости  $\sigma$  проводящей пластины и построении годографа  $U_{вн}^*$  от изменения  $\sigma$  в качестве проводящих объектов с разными значениями  $\sigma$  используются пластины одной толщины  $T=1$ мм, но из немагнитных материалов с разными проводящими свойствами: дюралевая с  $\sigma_1 = 16,7$  МСм/м; алюминиевая с  $\sigma_2 = 32$  МСм/м и медная с  $\sigma_3 = 52,3$  МСм/м. Значение зазора  $h$  между блоком обмоток и проводящей пластиной устанавливается равным нулю. Измерения проводятся по методике, описанной в разделе 6.1. Строятся зависимости  $U_{вн}^*(\sigma)$ ,  $\varphi(\sigma)$ , годограф  $U_{вн}^*$  от изменения  $\sigma$ . Для трех экспериментально найденных точек годографа вычисляются значения обобщенного параметра  $\beta$ .

6.4. При определении зависимости  $U_{вн}^*$  от перемещения вихретокового преобразователя над дефектом сплошности используется набор дюралевых пластинок в трех вариантах их расположения, показанных на рис. 5. Перемещение вихретокового преобразователя осуществляется вдоль оси  $X$  в диапазоне (-30...30) мм с шагом 5 мм. Измерения проводятся по методике, описанной в разделе 6.1. Строятся годографы  $U_{вн}^*$  от изменения  $X$ .

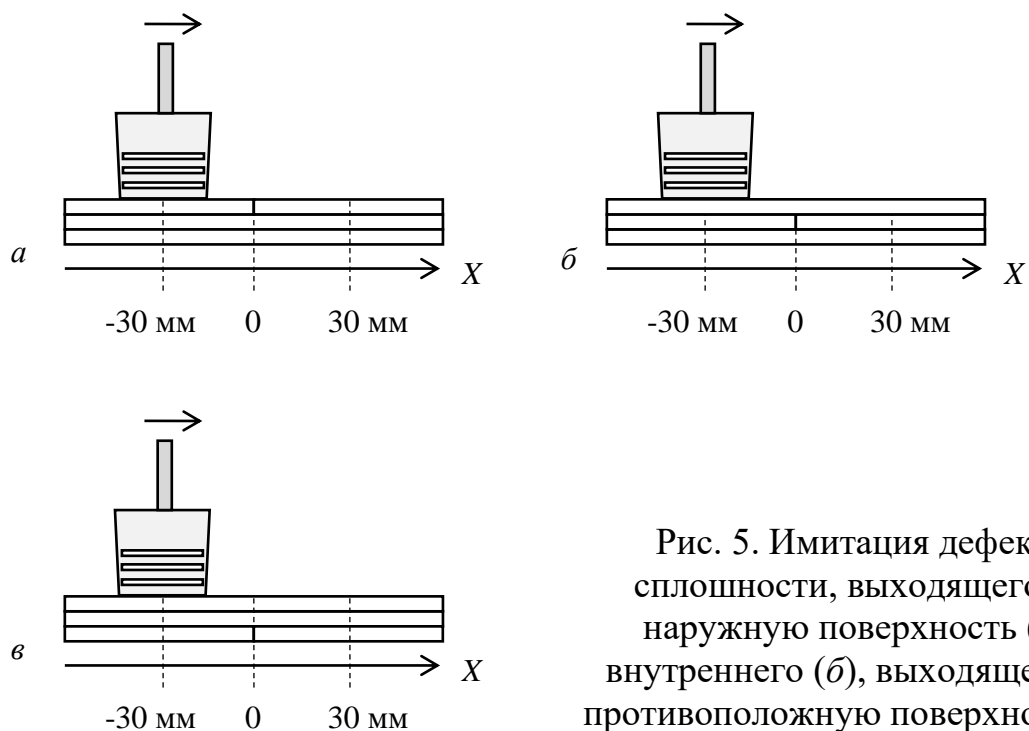


Рис. 5. Имитация дефекта сплошности, выходящего на наружную поверхность (*a*), внутреннего (*б*), выходящего на противоположную поверхность (*в*)

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. Название работы.

7.2. Цель работы.

7.3. Программа работы.

7.4. Схема экспериментальной установки.

7.5. Основные соотношения, примеры расчетов.

7.6. Результаты экспериментов и расчетов, оформленные в виде таблиц.

7.7. Графики зависимостей и годографы.

7.8. Выводы.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учебник Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.
2. Гольдштейн А.Е., Абрашкина И.А. Физические основы измерительных преобразований. Моделирование измерительных преобразований и решение практических задач: Учебное пособие / А.Е. Гольдштейн, И.А. Абрашкина – Томск: Издательство томского политехнического университета, 2012. – 143 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 8 томах. Т 2: в 2-х кн.: Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
4. Руководство пользователя Mathcad. 2017 – [http://old.exponenta.ru/soft/Mathcad/usersguide/chapter12/12\\_4.asp](http://old.exponenta.ru/soft/Mathcad/usersguide/chapter12/12_4.asp)

Составитель: профессор ОКД ИШНКБ, д.т.н. А.Е. Гольдштейн