

УДК 620.179.14

В. А. Новиков, д-р техн. наук, проф., Г. И. Скрыбина, канд. техн. наук, доц.,  
А. В. Кушнер

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА ОБЪЕКТА, НАМАГНИЧЕННОГО СТАЦИОНАРНЫМ МАЛОГАБАРИТНЫМ МАГНИТОМ

Выполнен расчет составляющих магнитного поля в зоне поверхностного дефекта ферромагнитного объекта, намагниченного стационарным постоянным магнитом, с учетом и без учета неравномерности распределения поверхностных «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта. Проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов.

В [1] получены аналитические выражения для тангенциальной и нормальной составляющих магнитного поля в зоне поверхностного дефекта ферромагнитного объекта, намагниченного стационарным постоянным магнитом. На основании этих зависимостей выполнены расчеты тангенциальной составляющей магнитного поля с учетом и без учета

неравномерности распределения поверхностных «магнитных зарядов»  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  на боковых гранях дефекта (рис. 1). Компоненты поля в зоне поверхностного дефекта определены для случая, когда магнит обращен к объекту гранью с одним полюсом.

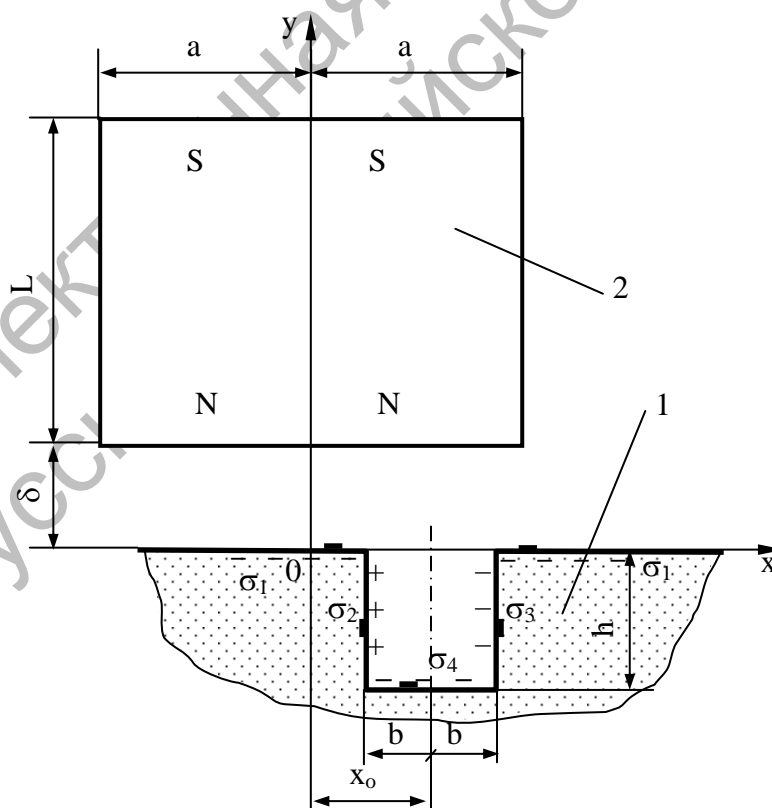


Рис. 1. Расположение постоянного магнита относительно дефекта сплошности: 1 – намагничиваемый объект; 2 – магнит;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  – плотности «магнитных зарядов» на поверхности объекта, боковых стенках и дне дефекта соответственно

Магнит имеет ширину  $2a = 30$  мм, высоту  $L = 6,5$  мм. Расстояние от более близкой грани магнита до поверхности ферромагнитного объекта составляло  $\delta = 0,2$  мм и  $\delta = 7$  мм, расстояние от поверхности объекта до точки наблюдения  $y = 0,025$  мм. Несплошности имели глубину от 0,1 до 10 мм и ширину от 0,2 до 2 мм.

Результаты расчетов, представленные на рис. 2 и 3, показали, что наибольший вклад в формирование магнитного поля на поверхности объекта в зоне поверхностного дефекта вносят составляющие магнитного поля от действия «магнитных зарядов» на поверхности изделия и дне дефекта.

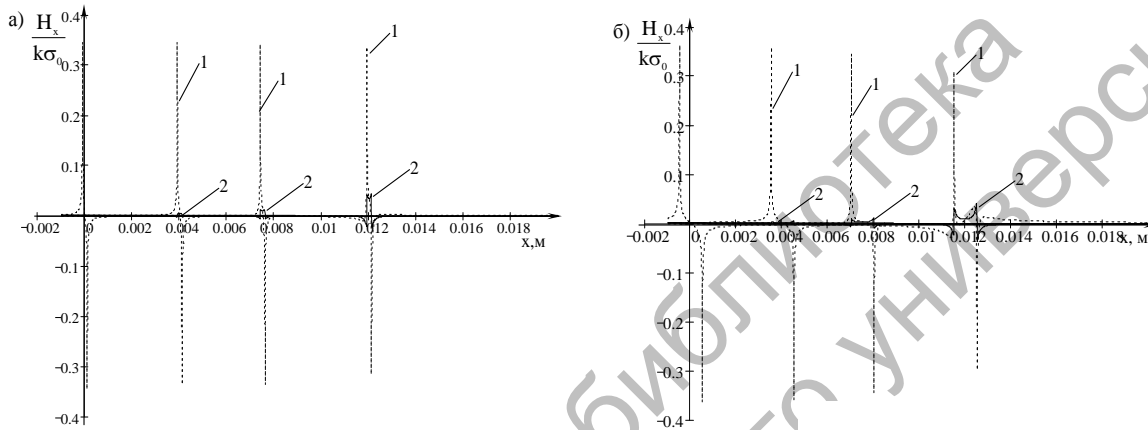


Рис. 2. Характер изменения в зоне дефекта горизонтальной составляющей результирующего поля (кривые 1) и его компонент, обусловленных «магнитными зарядами» на боковых гранях дефекта (кривые 2), с учетом неравномерности распределения  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  для дефекта глубиной  $h = 0,1$  мм при различном расстоянии  $x_0$  дефекта от плоскости симметрии магнита: а –  $h = 0,1$  мм,  $2b = 0,2$  мм; б –  $h = 0,1$  мм,  $2b = 1$  мм;  $x_0 = 0; 4; 7,5; 14$  мм

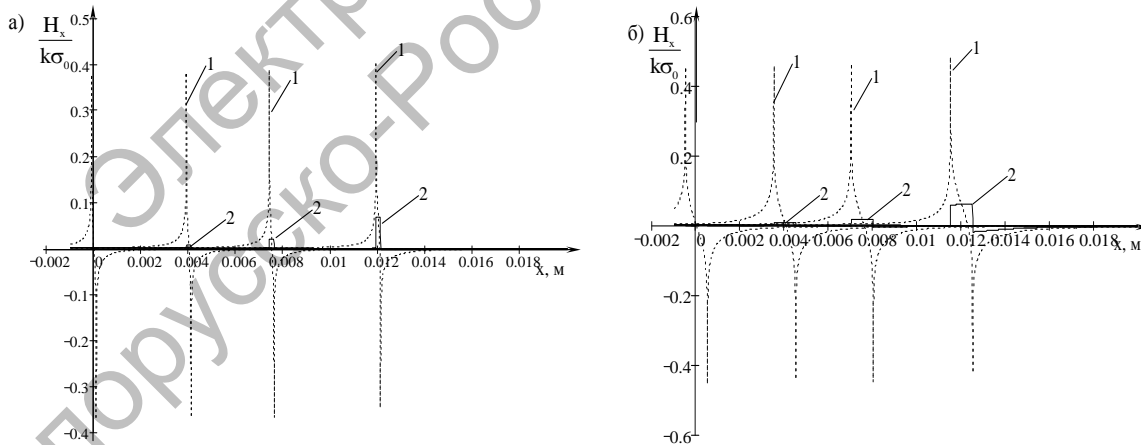


Рис. 3. Характер изменения в зоне дефекта горизонтальной составляющей результирующего поля (кривые 1) и его компонент, обусловленных «магнитными зарядами» на боковых гранях дефекта (кривые 2), с учетом неравномерности распределения  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  для дефекта глубиной  $h = 2$  мм при различном расстоянии  $x_0$  дефекта от плоскости симметрии магнита: а –  $h = 2$  мм,  $2b = 0,2$  мм; б –  $h = 2$  мм,  $2b = 2$  мм;  $x_0 = 0; 4; 7,5; 14$  мм

Вклад в результирующее поле от компонент, обусловленных действием «магнитных зарядов», расположенных на боковых гранях дефекта, колеблется

от 1 до 30 % в зависимости от расстояния  $x_0$  между плоскостями симметрии магнита и дефекта (рис. 2...6, кривые 2).

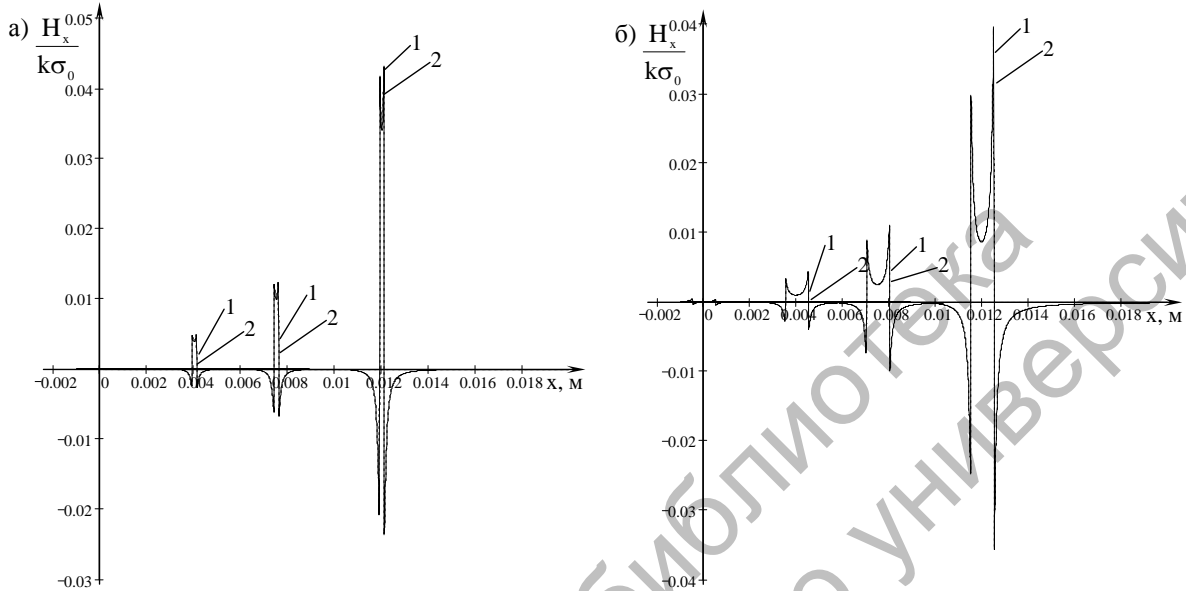


Рис. 4. Характер изменения горизонтальных компонент поля, обусловленных только «магнитными зарядами» на боковых гранях дефекта глубиной  $h = 0,1$  мм, расположенного в объекте на расстоянии  $x_0$  от плоскости симметрии магнита, с учетом (1) и без учета (2) неравномерности «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта: а –  $h = 0,1$  мм,  $2b = 0,2$  мм; б –  $h = 0,1$  мм,  $2b = 1$  мм;  $x_0 = 0; 4; 7,5; 14$  мм

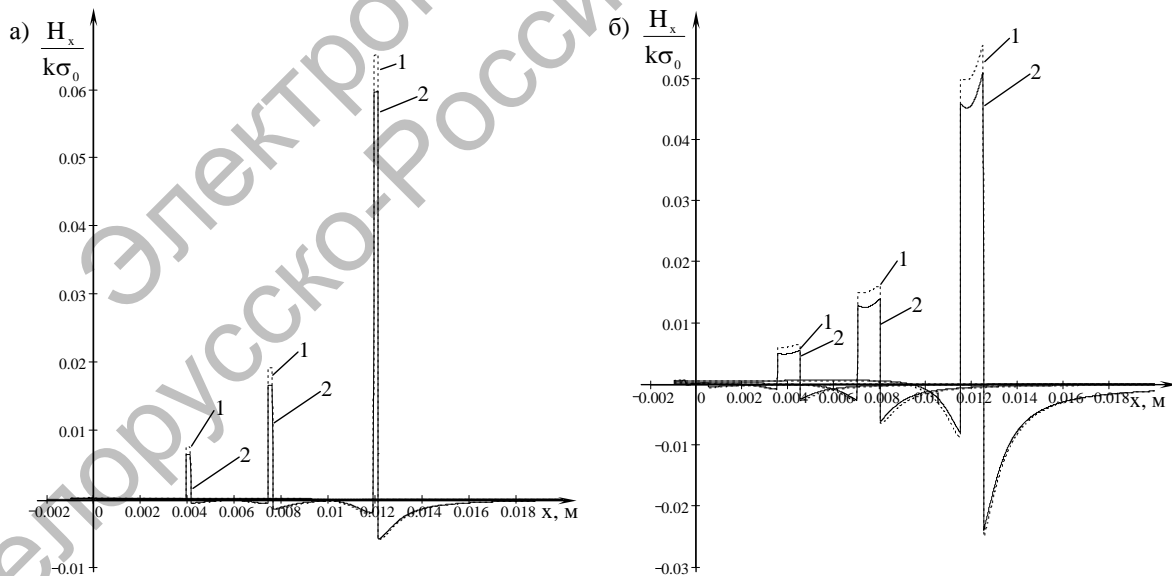


Рис. 5. Характер изменения горизонтальных компонент поля дефекта, обусловленных только «магнитными зарядами» на боковых гранях дефекта глубиной  $h = 1$  мм, расположенного в объекте на расстоянии  $x_0$  от плоскости симметрии магнита, с учетом (1) и без учета (2) неравномерности «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта: а –  $h = 1$  мм,  $2b = 0,2$  мм; б –  $h = 1$  мм,  $2b = 1$  мм;  $x_0 = 0; 4; 7,5; 14$  мм

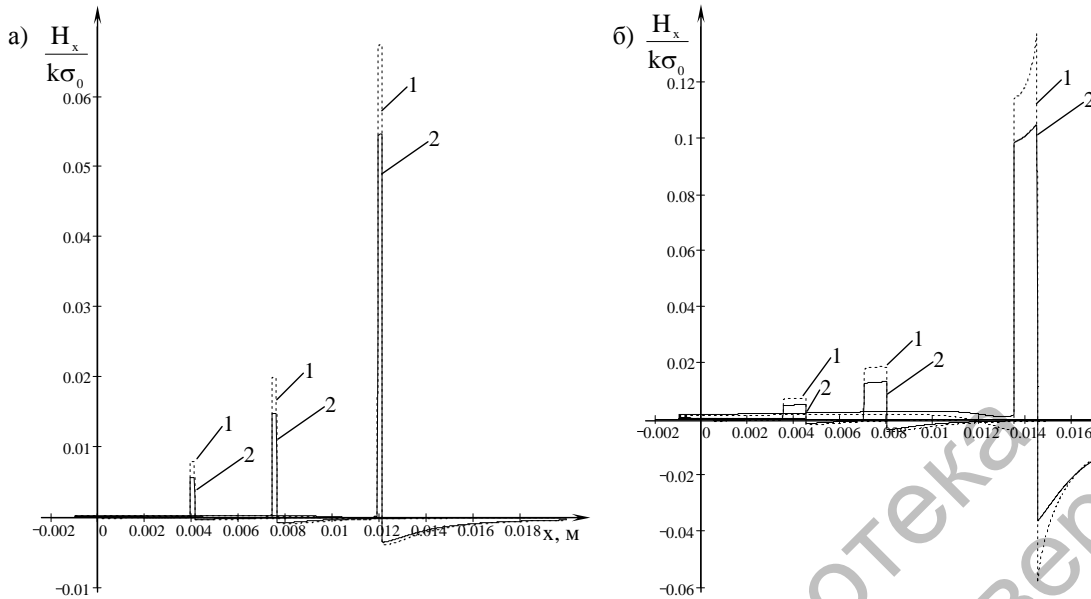


Рис. 6. Характер изменения горизонтальных компонент поля дефекта, обусловленных только «магнитными зарядами» на боковых гранях дефекта глубиной при  $h = 2$  мм, расположенного в объекте на расстоянии  $x_0$  от плоскости симметрии магнита, с учетом (1) и без учета (2) неравномерности «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта: а –  $h = 2$  мм,  $2b = 0,2$  мм; б –  $h = 2$  мм,  $2b = 1$  мм;  $x_0 = 0; 4; 7,5; 14$  мм

Причем в пределах  $-\frac{a}{2} \leq x_0 \leq \frac{a}{2}$  этот вклад невелик, поэтому при расчетах  $\frac{H_x}{k\sigma_0}$  в этих пределах наличие  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , возникающих под действием тангенциальной составляющей  $H_{0x}$  первичного поля, можно не учитывать и считать первичное поле однородным ( $H_0 = H_{0y}$ ).

Тангенциальная составляющая магнитного поля в зоне дефекта, обусловленная только «магнитными зарядами» на боковых гранях несплошности, имеет асимметричный вид и с уменьшением отношения ширины дефекта к его глубине трансформируется из кривой, имеющей два положительных и два отрицательных (меньшей величины) экстремума, в кривую, имеющую один положительный и один отрицательный экстремум (см. рис. 4...6). Степень асимметрии увеличивается с увеличением ширины дефекта и его расстояния до плоскости симметрии магнита. Чем глубже дефект, тем больше погрешность от неучета неравномерно-

сти распределения «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта.

Для анализа влияния неравномерности распределения «магнитных зарядов» на топографию магнитного поля в зоне дефекта выполнены расчеты  $\frac{H_x}{k\sigma_0}$

при максимальном смещении дефекта различной глубины от плоскости симметрии магнита ( $x_0 = 14$  мм) для дефектов (рис. 7 и 8). Анализ показывает, что неучет влияния неравномерности распределения «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта малой глубины вносит незначительную погрешность в результаты расчета. Для дефектов глубиной  $h < 3$  мм, расположенных под краем магнита, расчет  $\frac{H_x}{k\sigma_0}$  можно вы-

полнять по аналитическим зависимостям при  $\sigma_1 = \text{const}$ , а при расчете полей в зоне дефектов большей глубины необходим учет неравномерности распределения  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ .

Кривая, отражающая характер из-

менения тангенциальной составляющей поля в зоне дефекта от действия всех «магнитных зарядов» (на поверхности объекта, на боковых гранях и дне дефекта), имеет асимметричный вид, смещена вверх относительно оси абсцисс, содержит два экстремума, причем

положительный экстремум по модулю тем больше отрицательного, чем ближе дефект расположен к краю магнита (рис. 2, 3, 7, 8). Это объясняется увеличением вклада составляющей от действия «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта.

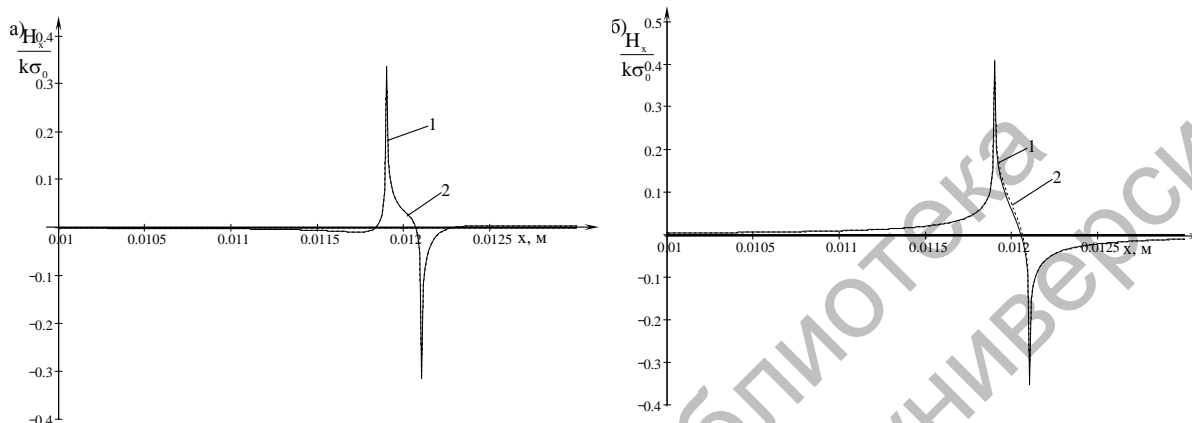


Рис. 7. Характер изменения горизонтальной составляющей напряженности суперпозиции магнитных полей в зоне дефекта шириной  $2b = 0,2$  мм, расположенного в объекте на расстоянии  $x_0 = 12$  мм относительно плоскости симметрии магнита, с учетом (1) и без учета (2) неравномерности распределения «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта: а – для дефекта глубиной  $h = 0,1$  мм,  $2b = 0,2$  мм; б – для дефекта глубиной  $h = 2$  мм,  $2b = 0,2$  мм

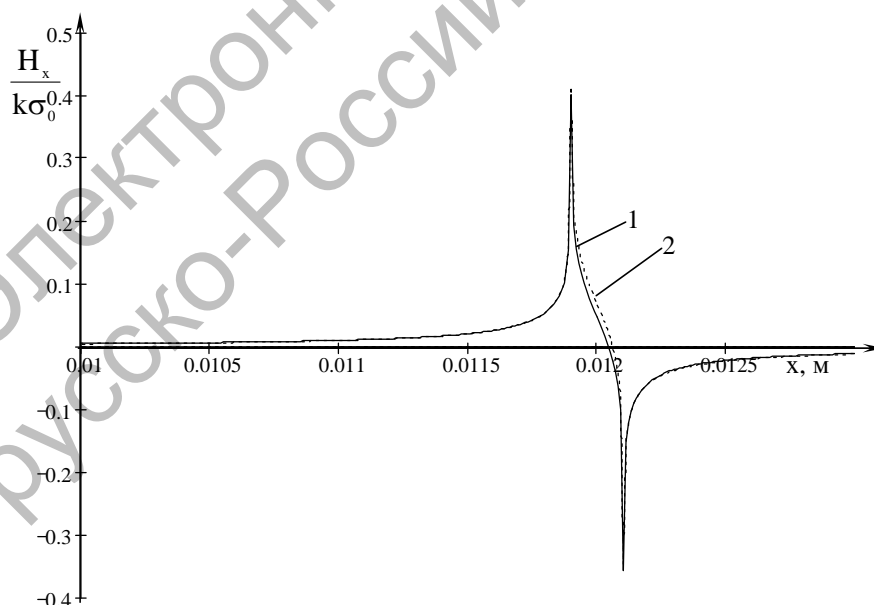


Рис. 8. Характер изменения горизонтальной составляющей напряженности суперпозиции магнитных полей в зоне дефекта глубиной  $h = 3$  мм и шириной  $2b = 0,2$  мм, расположенного в объекте на расстоянии  $x_0 = 12$  мм от плоскости симметрии магнита, с учетом (1) и без учета (2) неравномерности плотности распределения «магнитных зарядов» на боковых гранях дефекта

Экспериментальные топографии суперпозиции тангенциальных компонент магнитных полей в зоне дефектов шириной  $2b = 1,8$  мм и глубиной 3 мм, расположенных на расстоянии  $x_0 = 4$  мм (рис. 9) и  $x_0 = 12$  мм (рис. 10) от плоскости симметрии постоянного магнита размерами  $50 \times 37 \times 15$  мм, получены с помощью измерителя магнитной индукции ИОН-3, преобразователь Холла которого располагался на расстоянии

$y = 1,5$  мм от поверхности объекта, что обусловлено конструктивными возможностями преобразователя. Расстояние от ближайшей грани магнита до поверхности объекта составляло  $\delta = 7$  мм. Результаты экспериментальных исследований для указанных дефектов (см. рис. 9 и 10) имеют качественное совпадение с результатами расчетов (рис. 11).

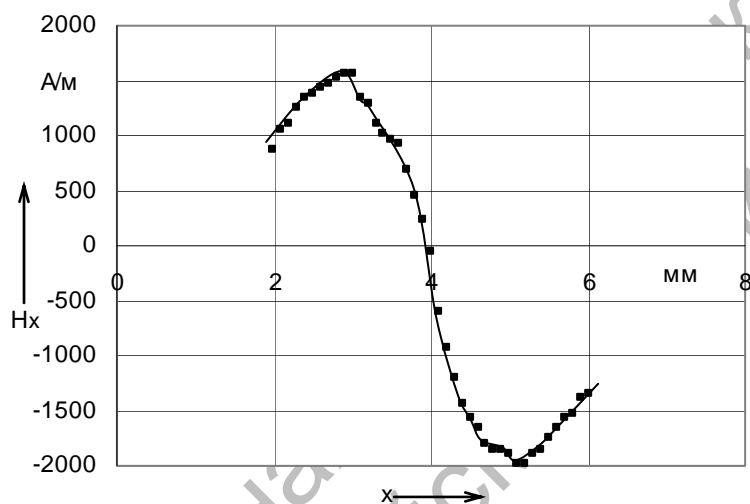


Рис. 9. Экспериментальная топография горизонтальной составляющей магнитного поля в зоне дефекта шириной  $2b = 1,8$  мм и глубиной 3 мм, расположенного в образце на расстоянии  $x_0 = 4$  мм от плоскости симметрии магнита

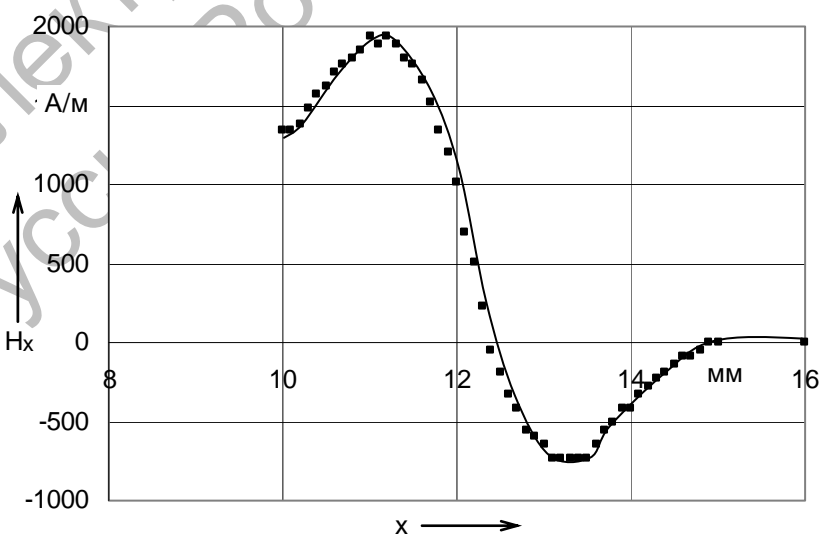


Рис. 10. Экспериментальная топография горизонтальной составляющей магнитного поля в зоне дефекта шириной  $2b = 1,8$  мм и глубиной 3 мм, расположенного в образце на расстоянии  $x_0 = 12$  мм от плоскости симметрии магнита

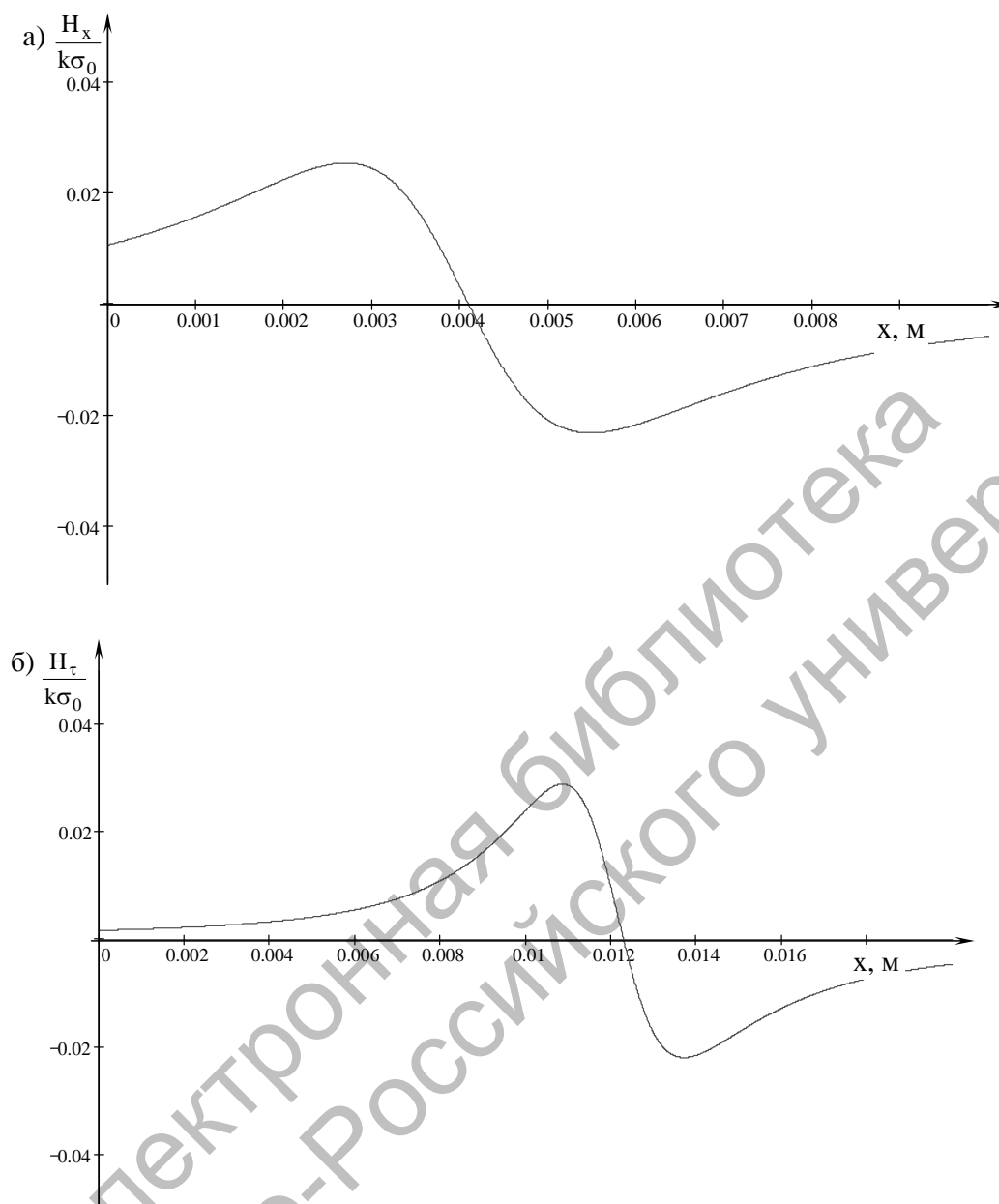


Рис. 11. Расчетные топографии горизонтальной составляющей магнитного поля в зоне дефекта виде паза шириной  $2b = 1,8$  мм и глубиной 3 мм, расположенного на расстоянии  $x_0 = 4$  мм и  $x_0 = 12$  мм от плоскости симметрии магнита: а – дефект расположен на расстоянии 4 мм от плоскости симметрии магнита; б – дефект расположен на расстоянии 12 мм от плоскости симметрии магнита

Установлено, что расчетная сигналограмма  $\frac{1}{k\sigma_0} \cdot \frac{dH_x}{dx}(x)$  (рис. 12), соответствующая несплошности с дном, смещенной относительно плоскости симметрии неподвижного магнита, обращенного к объекту гранью с одним полюсом, имеет асимметричный вид и

содержит два положительных и два отрицательных экстремума, а ее положительная часть содержит глубокий провал. Степень асимметрии сигнала зависит от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита и объясняется нахождением граней несплошности в поле разной напряженности.

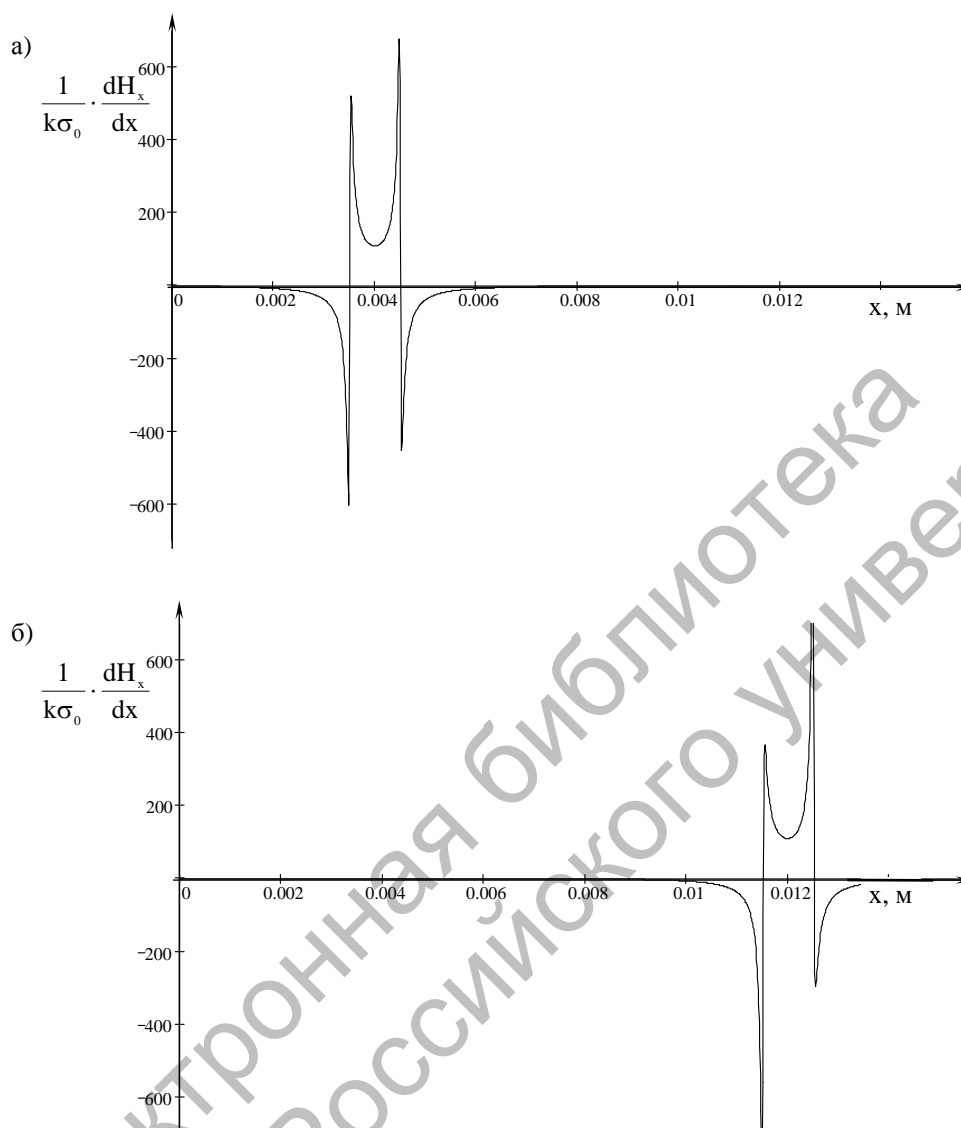


Рис. 12. Расчетные сигналограммы, соответствующие дефекту в виде паза шириной  $2b = 1,8$  мм и глубиной 3 мм, расположенного в образце на расстоянии  $x_0 = 4$  мм и  $x_0 = 12$  мм от плоскости симметрии магнита

Получить экспериментальную сигналограмму при намагничивании ферромагнитного образца с дефектом постоянным магнитом в соответствии со схемой (см. рис. 1) не представляется возможным, т. к. магнитная лента подвергнется намагничиванию на стадии приближения магнита к объекту с уложенной на его поверхность лентой, а также при его удалении от объекта (или при удалении магнитной ленты после

намагничивания). Поэтому процесс намагничивания моделировали, используя для намагничивания электрическую катушку с сердечником в форме прямоугольного параллелепипеда из магнитомягкого материала. С этой целью на поверхность жестко закрепленного ферромагнитного образца с дефектом наружной поверхности укладывали предварительно размагниченную магнитную ленту и располагали на необходимом



расстоянии от него сердечник электромагнита. На 2...3 с включали ток в катушке электромагнита, а после его отключения и удаления электромагнита снимали ленту с объекта и полученную запись считывали на дефектоскопе.

Показано, что экспериментальные сигналограммы качественно близки к расчетным только для несплошностей, ширина которых больше чем в 2,5 раза

превышает толщину сердечника индукционной головки дефектоскопа, что определяется разрешающей способностью измерительного устройства (рис. 13). Если несплошность имеет ширину меньше 2 мм, то характерный провал на сигналограмме отсутствует, а ее отрицательные экстремумы становятся много меньше по модулю положительного.

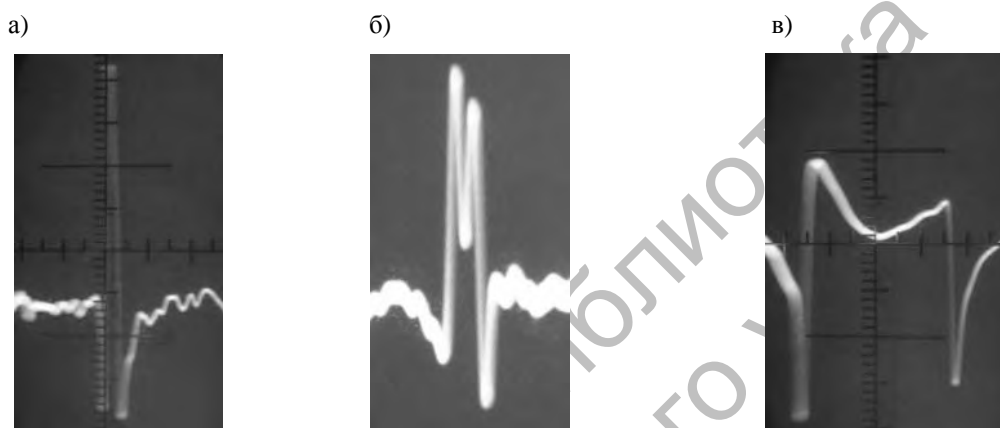


Рис. 13. Экспериментальные сигналограммы, соответствующие дефекту в виде паза, расположенного в образце на расстоянии  $x_0 = 4$  мм от плоскости симметрии магнита: а – ширина дефекта 1,2 мм, глубина 1,5 мм, расстояние между плоскостью симметрии магнита и дефекта  $\delta = 2$  мм; б – ширина дефекта 2,5 мм, глубина 0,45 мм,  $\delta = 4$  мм; в – ширина дефекта 8 мм, глубина 0,45 мм,  $\delta = 6$  мм

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков, В. А. Магнитное поле в зоне поверхностного дефекта объекта, намагничен-

ного стационарным малогабаритным магнитом / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4.

V. A. Novikov, G. I. Skryabina, A. V. Kushner  
The results of calculations and experimental studies of the magnetic field in the zone of surface defects of the object, magnetized by the stationary small-size magnet

The paper presents the calculation of the magnetic field components in the zone of the surface defect of a ferromagnetic object, magnetized by the stationary magnet, with and without taking into account the uneven distribution of surface «magnetic charges» on the side faces of the defect. A comparative analysis of theoretical and experimental results is done.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 04.08.2010