

УДК 537.636

С. С. ГРАБЧИКОВ<sup>1</sup>, А. В. ТРУХАНОВ<sup>1</sup>, А. А. СОЛОБАЙ<sup>1</sup>, В. Т. ЕРОФЕЕНКО<sup>2</sup>,  
Н. А. ВАСИЛЕНКОВ<sup>3</sup>

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ОБОЛОЧКАМИ

<sup>1</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь,  
e-mail: solobai@physics.by,

<sup>2</sup>Учреждение БГУ НИИ ППМ, Минск, Беларусь, e-mail: bsu\_erofeenko@tut.by,

<sup>3</sup>ЗАО «ТЕСТПРИБОР», Москва, Россия, e-mail: tp@test-expert.ru

В результате проведенных исследований и расчетов показано, что зависимости эффективности экранирования от напряженности магнитного поля в экранах с разной толщиной имеют максимумы, положения которых смещаются с ростом толщины экранирующего покрытия в область больших полей. Положения максимумов на кривых зависимостей  $\Theta = \Theta(H)$  и  $\mu = \mu(H)$  не совпадают друг с другом, что сложно интерпретировать в рамках модели шунтирования. Полученные результаты объяснены нелинейным характером распределения магнитной проницаемости по толщине экрана. Проведены аналитические расчеты усредненной магнитной проницаемости конечных цилиндрических оболочек различной толщины в зависимости от напряженности внешнего статического магнитного поля. Ход экспериментальных  $\Theta = \Theta(H)$  и рассчитанных  $\mu_0 = \mu_0(H)$  зависимостей, показывает, что положения максимумов коррелируют между собой.

*Ключевые слова:* магнитоэстатическое экранирование, магнитные сплавы, эффективность экранирования, магнитная проницаемость

S. S. GRABCHIKOV<sup>1</sup>, A. V. TRUKHANOV<sup>1</sup>, A. A. SOLOBAI<sup>1</sup>, V. T. EROFEENKO<sup>2</sup>, N. A. VASILENKOV<sup>3</sup>

### EFFECTIVENESS OF MAGNETOSTATIC SHIELDING BY CYLINDRICAL SHELLS

<sup>1</sup>Scientific and practical materials research centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: solobai@physics.by,

<sup>2</sup>BSU Institution "Scientific Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics", Minsk, Belarus,  
e-mail: bsu\_erofeenko@tut.by,

<sup>3</sup>CJSC "TESTPRIBOR", Moscow, Russia, e-mail: tp@test-expert.ru

Research and calculations results have been demonstrated that the dependence of the efficiency of magnetostatic shielding for shells with different thickness have a maximum whose position shifts with increasing thickness of the shielding cover in the area of higher fields. Positions of the peaks on the curve  $\Theta = \Theta(H)$  and  $\mu = \mu(H)$  do not coincide with each other. It is difficult to interpret in terms of the shunting model. The results can be explained by nonlinear nature of the distribution of the magnetic permeability within the thickness of the shields. The analytical calculations of the average permeability of cylindrical shells with varying thickness were carrying out depending on the strength of the external static magnetic field. It is shown that the courses of the experimental  $\Theta = \Theta(H)$  and calculated  $\mu_0 = \mu_0(H)$  dependencies correlate with position of maximum.

*Keywords:* magnetostatic shielding, magnetic alloys, shielding effectiveness, magnetic permeability.

**Введение.** Наиболее сложный способ защиты от воздействия внешних полей – экранирование статических магнитных полей [1, 2]. Обычно при рассмотрении магнитоэстатического экранирования исходят из принципа шунтирования магнитного поля ферромагнитным материалом [3, 4], основная суть которого заключается в замыкании силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку. Величина сопротивления магнитному потоку  $R_m$ , оказываемого экраном с магнитной проницаемостью  $\mu_a$ , длиной  $l$  средней линии магнитной индукции через материал и поперечным сечением  $S$  в направлении, перпендикулярном магнитному потоку, определяется выражением [4]:

$$R_m = \frac{1}{\mu_a S}. \quad (1)$$

Исходя из этого, следует, что для достижения максимальной эффективности экранирования статических магнитных полей необходимо использовать материалы, обладающие максимальными значениями  $\mu_a$  и  $S$ .

В аналитических расчетах эффективности экранов величина  $\mu_a$  обычно принимается постоянной для любой точки экрана [5]. В реальной ситуации, исходя из граничных условий для нормальной и тангенциальной составляющих векторов намагниченности и индукции [6], распределение магнитной проницаемости по толщине материала экрана имеет более сложный, нелинейный характер.

В связи с этим в настоящей работе проведены экспериментальные и аналитические исследования эффективности магнитоэкранирования цилиндрических однослойных образцов экранов с целью разработки оптимальной защиты корпусов приборов и аппаратуры широкого спектра назначения.

**Методика эксперимента.** Магнитные экраны формировались с помощью метода электролитического осаждения магнитомягких сплавов  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  [7]. Подложками служили медные заготовки цилиндрической формы с внешним диаметром 22 мм, внутренним диаметром 20 мм, длиной 40 мм. Толщина магнитного слоя экранов варьировалась в интервале от 50 до 400 мкм.

Количественная оценка эффективности экранирования ( $\mathcal{E}$ ) проводилась по результатам измерений отношения напряженностей или индукций магнитного поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана  $H$  (или  $B$ ) и при наличии его  $H_1$  (или  $B_1$ ) [8]:

$$\mathcal{E} = \frac{B}{B_1} = \frac{H}{H_1}. \quad (2)$$

Установка для исследования эффективности экранирования состояла из трех взаимно перпендикулярных катушек Гельмгольца, индуцирующих трехкомпонентное постоянное магнитное поле напряженностью от 0 до 4500 А/м. Испытываемый образец экрана помещался в однородное магнитное поле, создаваемое одной из пар катушек (намагничивающие катушки), питание которых осуществлялось от источника постоянного тока Б5-86/1 и контролировалось с помощью амперметра постоянного тока М253. Для изменения направления и типа тока (постоянный, переменный) в намагничивающих катушках применялось коммутирующее устройство. Другая пара катушек (компенсационные катушки) использовалась для компенсации магнитного поля Земли. Путем регулирования величины тока и направления оси катушек обеспечена компенсация внешнего магнитного поля Земли до уровня не менее 5 А/м.

Эффективность экранирования рассчитывалась на основе измерений величины ЭДС Холла в заданной центральной области пространства без экрана ( $\mathcal{E}$ ) и с экраном ( $\mathcal{E}_1$ ). Датчик Холла помещался в центральную зону испытываемого образца, которая соответствовала центру, расположенному вдоль оси намагничивающих катушек. Величина ЭДС Холла измерялась с помощью калиброванного элемента Холла чувствительностью 1мВ/30Э и цифрового вольтметра В7-34А либо нановольтметра постоянного напряжения В2-39. Питание датчика Холла проводилось от стабилизированного источника постоянного тока Б5-44А. Для размагничивания испытываемого образца использовалось переменное убывающее до нуля электромагнитное поле частотой 50Гц. Переменное электромагнитное поле напряжением до 2000А/м создавалось с помощью автотрансформатора АРОС-2 и контролировалось вольтметром переменного напряжения Ц4200.

Неоднородность в распределении индукции магнитного поля по трем осям в обе стороны относительно центра трех катушек на расстояниях 4, 6, 8 и 10 см составляла не более 0,4, 0,8 1,7 и 3,1% соответственно.

Начальная кривая намагничивания, петли гистерезиса, статические магнитные характеристики (максимальная магнитная проницаемость  $\mu_a$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , поле насыщения  $H_s$ ) измерены баллистическим методом [9]. Для этого изготовлены образцы кольцевой формы с внешним 45 мм и внутренним 25 мм диаметрами. Намагничивающая обмотка формировалась прово-

дом диаметром 0,5мм в количестве 100 витков и измерительная обмотка – проводом диаметром 0,08 мм в количестве 200 витков.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Для интерпретации данных по эффективности экранирования экспериментально измерены начальная кривая намагничивания и характеристики петель гистерезиса пленок сплава  $Ni_{80}Fe_{20}$ . Значения  $\mu_a$  для сплава  $Ni_{80}Fe_{20}$  толщинами от 20 до 200 мкм составили  $(0,8-1,3) \cdot 10^4$  (рис. 1), величины  $H_c$  и  $H_s$  – 40–50 и 350 – 400А/м соответственно.

На рис. 2 представлены зависимости эффективности экранирования от напряженности магнитного поля для образцов пленок толщиной 50, 180 и 400 мкм. Для лучшего восприятия результатов графиков  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  по оси  $Y$  построены две шкалы. Левая шкала соответствует ходу зависимости  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  для образцов толщиной 180 и 400 мкм, правая шкала – ходу зависимости для образцов толщиной 50 мкм. Как видно, с ростом толщины пленок на основе сплавов  $Ni_{80}Fe_{20}$  эффективность экранирования возрастает, что согласуется с принципом шунтирования (1), (2) и связано с увеличением площади сечения экрана, снижением магнитного сопротивления. Необходимо отметить, что с ростом напряженности магнитного поля в пленках толщиной 50 и 180 мкм величина  $\mathcal{E}$  растет до 900–1000 и 1800–2000 А/м соответственно. При более высоких значениях  $H$  наблюдается спад эффективности экранирования пленок. При толщине 400 мкм во всем интервале используемых магнитных полей вплоть до 3600 А/м наблюдается рост величины  $\mathcal{E}$ .

Ход зависимости  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  для пленки толщиной 50 мкм подобен ходу зависимости  $\mu = \mu(H)$  (рис. 1). Однако можно отметить, что положения максимумов  $\mathcal{E}$  и  $\mu$  достигаются при различных значениях аргумента  $H$ . При увеличении толщины пленки до 180 мкм максимум эффективности экранирования сильнее смещается в сторону больших значений напряженностей полей, а в пленках толщиной 400 мкм во всем интервале приложенных полей максимума  $\mathcal{E}$  не достигается. Подобные результаты эксперимента сложно объяснить в рамках модели шунтирования, так как существенно проявляется нелинейность процесса.

Исходя из выражения (2) и данных (рис. 2), можно оценить значения напряженностей магнитного поля внутри конечных цилиндрических экранов толщиной 50, 180 и 400 мкм (таблица).

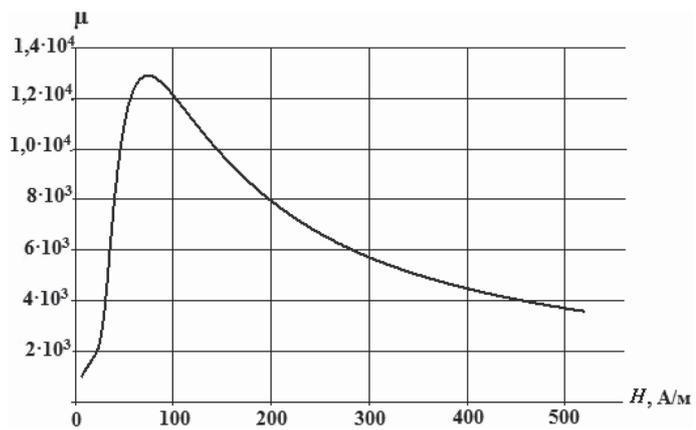


Рис. 1. Начальная кривая намагничивания сплава  $Ni_{80}Fe_{20}$  толщиной 200 мкм

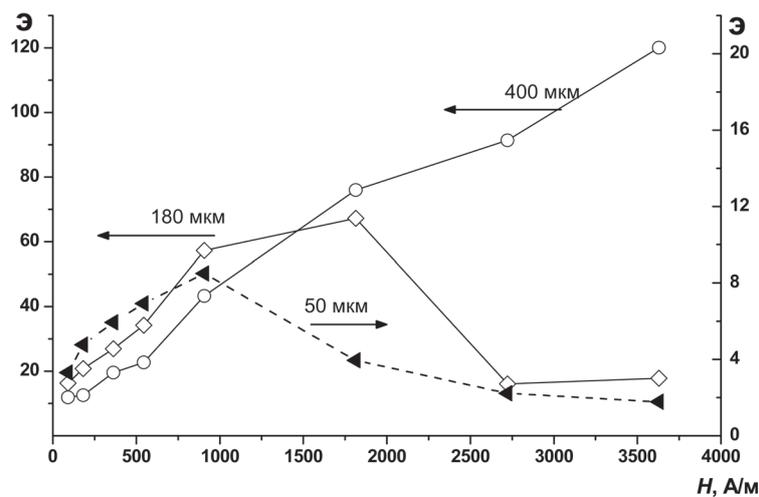


Рис. 2. Зависимости эффективности экранирования от напряженности магнитного поля для пленок сплавов  $Ni_{80}Fe_{20}$  толщиной 50 (▲), 180 (◇) и 400 (○) мкм

Из нее видно, что с ростом напряженности внешнего магнитного поля  $H$  от 90 до 900 А/м эффективность экранирования повышается, магнитное поле  $H_1$  внутри экрана также увеличивается. При значениях  $H$ , больших 900 А/м, вследствие снижения  $\mathcal{E}$  резко возрастает величина  $H_1$ . Приведенный ход зависимости по своему характеру совпадает с ходом зависимости  $\mu = \mu(H)$  (рис. 1), только положение максимума на кривой  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  сдвинуто в сторону больших значений  $H$ . Причина данного сдвига может быть связана с нелинейным характером изменения магнитной проницаемости по толщине экрана. В то время как внешний магнитный слой экрана под действием магнитного поля  $H$  находится в состоянии  $\mu(H)$ , внутренние слои по мере проникновения в глубь экрана находятся под действием магнитных полей со значениями от  $H$  до  $H_1$ . Соответственно будет изменяться и величина магнитной проницаемости. Как видно из таблицы, максимальным величинам  $\mathcal{E}$  экрана на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  толщиной 50 мкм соответствуют значения  $H_1 = 73\text{--}102$  А/м. Данные значения отвечают положению максимума на кривой зависимости  $\mu = \mu(H)$  (рис. 1). Из этого следует, что магнитный материал находится в состоянии магнитного насыщения (все слои магнитного экрана достигли состояния максимума магнитной проницаемости). Поэтому при дальнейшем увеличении  $H$  материал переходит в состояние магнитного насыщения, уменьшаются значения  $\mu$  по всей толщине экрана и соответственно снижается его общая эффективность.

Экран на основе пленок сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  различной толщины

Параметр	$H$ , А/м							
	90	180	360	540	900	1800	2700	3600
<i>Толщина пленки 50 мкм</i>								
$\mathcal{E}$	3,3	4,8	5,9	6,9	8,5	4,0	2,2	1,8
$H_1$ , А/м	24	36	58	73	102	450	1227	2000
<i>Толщина пленки 180 мкм</i>								
$\mathcal{E}$	12	18	25	32	55	72	15	16
$H_1$ , А/м	7,5	10,0	14,4	16,8	16,4	25,0	180	225
<i>Толщина пленки 400 мкм</i>								
$\mathcal{E}$	12	13	18	22	42	75	90	120
$H_1$ , А/м	7,5	13,8	20,0	24,5	21,4	24,0	30,0	30,0

В таблице представлены значения  $H$ ,  $H_1$  и  $\mathcal{E}$  для экрана толщиной 180 мкм. Как видно, максимальной эффективности экрана соответствуют значения  $H_1$  в области 25 А/м. Повышение  $H_1$  до 150 А/м обусловлено резким снижением величины  $\mathcal{E}$ . Данные значения согласуются с приведенными выше результатами эксперимента и положением максимума на кривой зависимости  $\mu = \mu(H)$  (рис. 1).

В таблице приведены значения  $H$ ,  $H_1$  и  $\mathcal{E}$  для экрана на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  толщиной 400 мкм. В данном случае во всем интервале используемых полей внутренние слои магнитного экрана не достигают состояния максимума магнитной проницаемости. Поэтому на кривой зависимости  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  не наблюдается максимум эффективности экранирования (рис. 2).

Для подтверждения данного предположения рассмотрим граничные условия нормальной составляющей индукции ( $B_{A1}$ ,  $B_{A2}$ ) и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля ( $H_{A1}$ ,  $H_{A2}$ ) на границе раздела двух сред в точке  $A$  (рис. 3) [6]:

$$B_{A1} = B_{A2}; \quad H_{A1} = H_{A2}. \quad (3)$$

Поскольку магнитная проницаемость определяется выражениями

$$\mu = \mu(H), \quad \mu = B/H, \quad (4)$$

то магнитная проницаемость материала экрана на внешней  $\mu_A^1$  и внутренней  $\mu_A^2$  границах в точке  $A$ ; внешней  $\mu_B^1$  и внутренней  $\mu_B^2$  границах в точке  $B$  определяется таким образом:

$$\mu_A^1 = \mu_A^2, \quad \mu_B^1 = \mu_B^2. \quad (5)$$

На основании выражений (3)–(5) для случая, когда внешнее однородное магнитное поле ортогонально относительно оси экрана ( $H$ ), а магнитное поле внутри экрана ( $H_1$ ), можно записать

$$\mu_A^1 = \mu_A^2 = \mu(H); \mu_B^1 = \mu_B^2 = \mu(H_1). \quad (6)$$

Поскольку значение  $H$  в Э раз больше значения  $H_1$ , то и значения  $\mu_A^1, \mu_A^2$  в Э раз больше значений  $\mu_B^1, \mu_B^2$ , т.е. величина магнитной проницаемости уменьшается по мере проникновения в глубь экрана.

Для сопоставления полученных результатов с характеристиками промышленных материалов проведены измерения эффективности экранов, изготовленных из аморфной ленты 84КХСР и электролитического сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ . Лента 84КХСР на основе аморфного сплава  $\text{CoFeBSiCr}$  толщиной 40 мкм (завод-производитель ОАО «Ашинский металлургический завод», РФ) имела следующие характеристики:  $\mu_a = 10^6$ ,  $H_c = 0,7$  А/м,  $B_s = 0,58$  Тл; коэффициент прямоугловности 0,7. Экран в форме стакана диаметром 70 мм, высотой 28 мм изготавливался из ленты при помощи клеевой сборки пакетов, содержащих 10 слоев толщиной 40 мкм, и последующей термообработки при температуре 400 °С в течение 1 ч. Экран на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  изготавливался по описанной выше методике с аналогичными экрану из ленты 84КХСР формой и размерами.

Зависимости эффективности экранирования магнитостатического поля экранами на основе электроосажденного сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  и аморфной ленты 84КХСР приведены на рис. 4. В области магнитных полей от 15 до 135 А/м эффективность экрана, изготовленного из ленты 84КХСР, выше, чем экрана из сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ . В интервале от 135 до 2700 А/м экраны на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  более предпочтительны, несмотря на то, что по величинам  $\mu_a$  они значительно уступают экранам на основе аморфной ленты 84КХСР. Как следует из результатов эксперимента, области эффективного экранирования у разных материалов существенно различаются. В аморфных сплавах 84КХСР, обладающих высокими значениями  $\mu_a$  и низкими значениями  $H_c = 0,7$  А/м, максимум магнитной проницаемости на кривой зависимости  $\mu = \mu(H)$  по оси абсцисс  $H\mu_a$  должен находиться в области магнитных полей ниже, чем 1 А/м. Более низкие значения  $H\mu_a$  экранов на основе аморфной ленты 84КХСР, чем у экранов на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ , определяют их высокую эффективность в интервале магнитных полей 15–135 А/м (рис. 4). При значениях  $H \geq 100$  А/м весь материал ленты 84КХСР переходит в состояние магнитного насыщения и эффективность экрана резко уменьшается. Можно отметить, что для оптимальной защиты от воздействия статических магнитных полей необходимо иметь четко заданные параметры экранируемых полей;

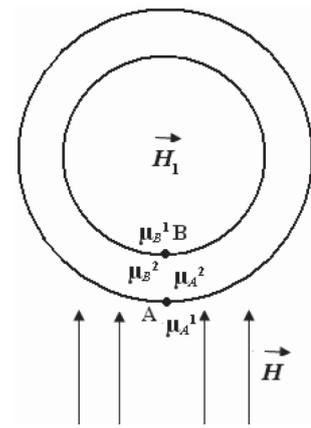


Рис. 3. Граничные условия в точках раздела двух сред А и В

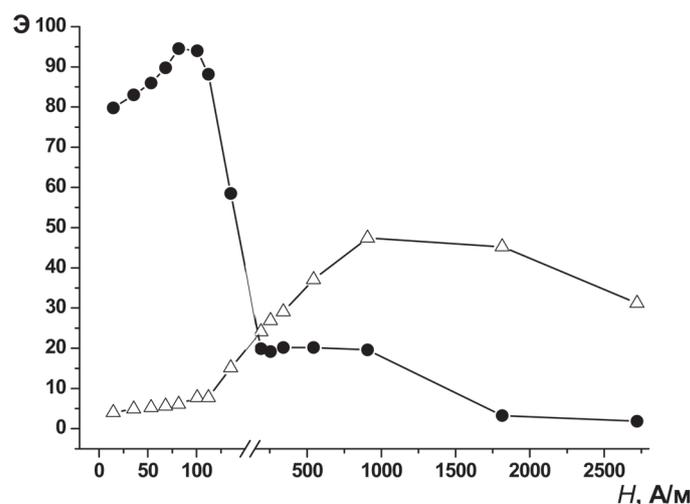


Рис. 4. Зависимости эффективности экранов на основе пленок сплавов  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  ( $\Delta$ ) и аморфной ленты 84КХСР ( $\bullet$ ) от напряженности магнитного поля

при подборе материалов экранов следует учитывать как основные магнитные характеристики (начальная и максимальная магнитные проницаемости, намагниченность насыщения, остаточная намагниченность), так и величину напряженности поля максимальной магнитной проницаемости.

Необходимо также обратить внимание на то, что максимальная эффективность конечных цилиндрических экранов достигается при внешних магнитных полях, более значительных, чем величина  $H$ , соответствующая максимальной  $\mu$ . Так, например, для аморфной ленты 84КХСР и сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  значения внешнего магнитного поля, при которых достигаются максимальные значения магнитной проницаемости, различны и составляют 1 и 80 А/м соответственно. В то время, как максимальная эффективность экранирования аморфной ленты 84КХСР отмечена в магнитном поле 80А/м, а для сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  – в магнитном поле 900А/м. Подобное несоответствие, по-видимому, связано с различной топологией магнитных потоков в образцах при измерениях параметров  $\mu$  и  $\mathcal{E}$ . В первом случае имеем однородный, замкнутый магнитный поток в образце кольцеобразной формы. Во втором – два магнитных потока, направленных навстречу друг другу в образце цилиндрической формы.

Некоторые несоответствия в результатах измерения эффективности экранирования сплавов  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ , (рис. 2, 4) обусловлены значительными различиями в размерах и форме испытываемых образцов экранов.

**Аналитический расчет эффективности экранирования конечной цилиндрической оболочкой.** В современной научной литературе, посвященной теории расчета экранирующих функций [8], успешно и детально решены задачи экранирования однородных магнитных полей для случаев простых геометрических форм – бесконечного плоского, бесконечного цилиндрического и сферического экранов. Для этого достаточно просто раскрывается основная суть физических явлений и выводятся основные формулы, связывающие параметры электромагнитного излучения и экранов с эффективностью экранирования. Для случая магнитоэлектростатического экранирования, разрешая краевую задачу с граничными условиями для бесконечного тонкостенного цилиндрического экрана, для эффективности экранирования (2), можно получить

$$\mathcal{E}_c = 1 + \frac{\mu d}{D}, \quad d \ll D, \mu \gg 1, \quad (7)$$

где  $d, D$  – толщина экрана, диаметр экрана соответственно.

Аналогично для тонкостенного сферического экрана

$$\mathcal{E}_c = 1 + \frac{4\mu d}{3D}. \quad (8)$$

Обычно на практике используют формулы (7), (8) при конструировании экранов. Оценка эффективности конструируемых форм проводят на основе расчетных и экспериментальных данных по наиболее простым геометрическим формам.

Отметим, что приведенная выше формула (7) выведена для бесконечного экрана и постоянного значения  $\mu$ . Рассмотрим, как изменяется ситуация в случае конечного цилиндрического образца экрана. В [10] показано, что для конечного цилиндрического экрана длиной  $l \approx 2D$  формула (7) приобретает следующий вид:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \frac{\mu d}{D} \right), \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ослабления эффективности,  $2 \leq \alpha \leq 2,6$ .

На основании формулы (9) вычисляем значение магнитной проницаемости экрана:

$$\mu = (\alpha \mathcal{E} - 1) \frac{D}{d}. \quad (10)$$

Результаты аналитического расчета зависимостей усредненной магнитной проницаемости ( $\mu_0$ ) от напряженности магнитного поля для конечных цилиндрических экранов толщиной 50,

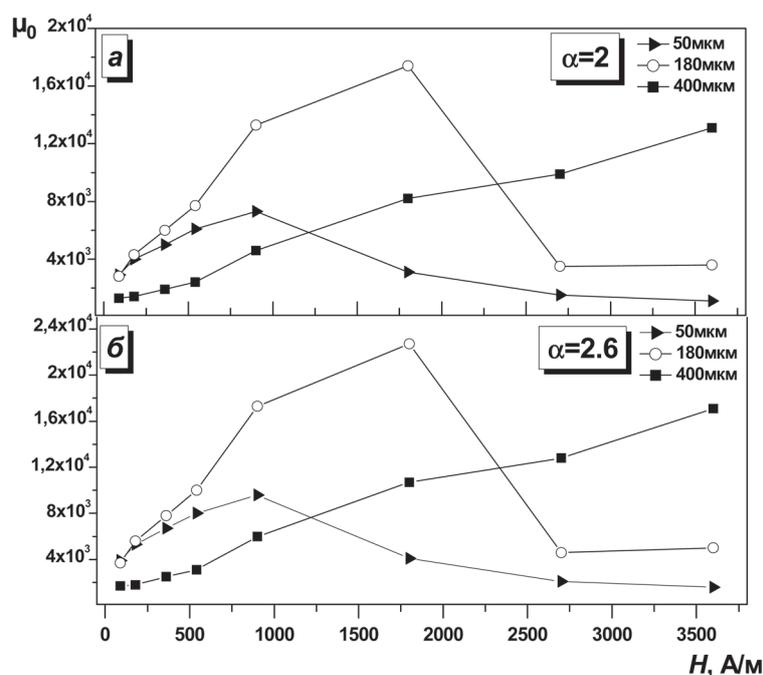


Рис. 5. Рассчитанные зависимости усредненной магнитной проницаемости конечных цилиндрических экранов толщинами 50, 180 и 400 мкм от напряженности внешнего магнитного поля при значениях параметра  $\alpha = 2$  (а); 2,6 (б)

180, 400 мкм при следующих значениях параметров:  $\alpha = 2; 2,6$ ,  $D = 2,2 \cdot 10^{-2}$  м;  $d = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $18 \cdot 10^{-5}$  и  $40 \cdot 10^{-5}$  м приведены на рис. 5 а, б.

Отметим, что использованная модель позволяет вычислить только усредненное значение магнитной проницаемости для образцов различной толщины. Характер рассчитанных зависимостей  $\mu_0 = \mu_0(H)$  коррелирует с ходом экспериментальных зависимостей  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  и положения максимумов  $\mu$  и  $\mathcal{E}$  на аналитических и экспериментальных зависимостях совпадают.

Как свидетельствуют результаты аналитических расчетов и экспериментов, с увеличением напряженности внешнего статического магнитного поля как магнитная проницаемость материала, так и эффективность экранирования нелинейно зависят от величины  $H$ .

**Заключение.** Выполнены экспериментальные исследования эффективности магнитоэкранирования и аналитические расчеты усредненной магнитной проницаемости цилиндрических однослойных образцов экранов на основе электролитически осажденных сплавов  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ .

Показано, что зависимости эффективности экранирования от напряженности магнитного поля в экранах толщиной 50 и 180 мкм имеют максимумы в интервале полей 900–1000 и 1800–2000 А/м соответственно. При дальнейшем увеличении толщины экранов максимумы эффективности смещаются в сторону больших значений напряженностей полей. Положения максимумов на кривых зависимостей  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  и  $\mu = \mu(H)$  не совпадают относительно друг друга, что сложно интерпретировать в рамках модели шунтирования. Полученные результаты объяснены нелинейным характером распределения магнитной проницаемости по толщине экрана.

Сопоставление экспериментальных результатов по эффективности экранов, изготовленных из сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  и промышленного материала 84КХСР, показало, что в интервале магнитных полей от 100 до 2700 А/м экраны на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  более предпочтительны, чем экраны на основе аморфной ленты 84КХСР. Сделан вывод, что при подборе материалов экранов необходимо учитывать как основные магнитные характеристики ( $\mu_a$ ,  $B_s$ ,  $B_r$ ), так и параметр  $H\mu_a$ , являющийся важным для оценки эффективности магнитного экранирования.

Проведены аналитические расчеты усредненной магнитной проницаемости конечных цилиндрических оболочек различной толщины в зависимости от напряженности внешнего статического магнитного поля. Ход экспериментально полученных  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  и теоретически рассчи-

танных  $\mu_0 = \mu_0(H)$  зависимостей показывает корреляцию положений максимумов по напряженности внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке грантов БРФФИ (Ф15PM-011) и РФФИ (15-52-04036-Бел-мол-а).

### Список использованной литературы

1. *Фуфаева, Л. И.* Эффективность экранирования постоянных магнитных полей многослойными экранами / Л. И. Фуфаева, А. Б. Тимофеев // Тр. МАИ. – 1976. – Вып. 364. – С. 58–63.
2. *Глонягин, Ю. В.* Элементы теории и расчета магнитостатических полей ферромагнитных тел / Ю. В. Глонягин. – Л.: Судостроение, 1967. – 180 с.
3. *Волин, М. Л.* Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / М. Л. Волин. – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
4. *Чернушенко, А. М.* Конструкции СВЧ устройств и экранов / А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.
5. *Апполонский, С. М.* Расчеты электромагнитных полей / С. М. Апполонский, А. Н. Горский. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.
6. *Зильберман, Г. Е.* Электричество и магнетизм / Г. Е. Зильберман. – М.: Наука, 1970. – 382 с.
7. *Грабчиков, С. С.* Многослойный электромагнитный экран / С. С. Грабчиков, Л. Б. Сосновская, Т. Е. Шарапа: пат. Респ. Беларусь 11843 от 28.01.2009.
8. *Шапиро, Д. Н.* Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л., 1975. – 112 с.
9. *Шрамков, Е. Г.* Электрические и магнитные измерения // Е. Г. Шрамков и др. – Л.: Из-во НКТП СССР, 1937. – 585 с.
10. Модель экранирования постоянных магнитных полей многослойным цилиндрическим экраном / В. Т. Ерофеев [и др.] // Информатика. – 2012. – №3 (35). – С. 80–93.

*Поступила в редакцию 15.04.2015*