

**УДК 537.86.52.7 + 58.027**

## **МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ СЛАБЫХ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ И ХОРОШО ВОСПРОИЗВОДИМОГО КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Богатина Н.И.<sup>1</sup>, Шейкина Н.В.<sup>2</sup>, Мартынюк В.С.<sup>3</sup>, Темуриянц Н.А.<sup>4</sup>,  
Павлюков Д.В.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Физико-технический институт низких температур НАН Украины, Харьков, Украина*

<sup>2</sup>*Национальный фармацевтический университет, Харьков, Украина*

<sup>3</sup>*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина*

<sup>4</sup>*Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Украина*

*E-mail: n\_bogatina@rambler.ru*

В работе описана методика создания, измерения и расчета крайне слабых магнитных и электрических полей с помощью пермаллового экрана. Измерены их магнитные шумы, рассчитаны шумы электрического поля и коэффициенты экранирования и ослабления магнитного и электрического полей.

**Ключевые слова:** экранирование магнитных и электрических полей, пермалловые экраны, магнитные шумы, шумы электрического поля.

Основная идея этой работы – это получение хорошо воспроизводимых условий эксперимента. Для этого необходимо до минимума снизить влияние непостоянного земного магнитного поля, т.е. экранировать его в рабочем объеме и в этом же объеме создать магнитное поле с заранее заданными хорошо воспроизводимыми и контролируруемыми от опыта к опыту характеристиками. С целью получения больших коэффициентов ослабления геомагнитного поля земли (ГМП) использовались ферромагнитные экраны, изготовленные из сплавов с высокой магнитной проницаемостью таких как: пермаллой.

### **1. Метод экранирования магнитного поля (МП) с помощью ферромагнитного экрана.**

Ферромагнитные экраны концентрируют силовые линии ГМП внутри своих стенок, что препятствует проникновению поля внутрь экрана [1].

В рабочий объем ферромагнитного экрана, имеющего форму полого цилиндра, внешнее магнитное поле МП может проникать через стенки экрана и через входные отверстия в нем, расположенные сверху и снизу.

Коэффициент экранирования, связанный с ослаблением МП, проникающего через стенку экрана для поперечного МП (направленного перпендикулярно оси экрана)  $S_{B\perp}$  рассчитывается по формуле [2]:

$$S_{B\perp} = B_{e\perp} / B_{i\perp} = \mu t / D, \quad (1)$$

где  $B_{e\perp}$  – величина индукции внешнего поперечного МП, а  $B_{i\perp}$  – величина индукции остаточного поперечного МП в рабочем объеме, на оси симметрии экрана,  $D$  – диаметр экрана,  $t$  – толщина его стенки,  $\mu$  – магнитная проницаемость материала экрана. На практике всегда  $\mu t / D \gg 1$ , а  $t/D \ll 1$ .

Соотношение (1) справедливо только для бесконечно длинного цилиндра. Однако оно выполняется с достаточной степенью точности при расчете  $S_{B\perp}$  для достаточно длинных цилиндров с соотношением длины к диаметру, равным 4 и выше.

Коэффициент экранирования по продольной составляющей  $S_{B\parallel}$  определяется формулой:

$$S_{B\parallel} = B_{e\parallel} / B_{i\parallel} = 1 + N\mu t / \pi D = 1 + (N/\pi)S_{B\perp}, \quad (2)$$

где  $N$  – коэффициент размагничивания для эллипсоида с соотношением осей  $p = L/D$ .

$$N = \left[ \frac{1}{p^2} - 1 \right] \left\{ p / (p^2 - 1)^{0.5} \ln \left[ p / (p^2 - 1)^{0.5} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

Коэффициент экранирования, связанный с ослаблением МП, проникающего в рабочий объем через открытый конец экрана, для поперечного МП определяется выражением:

$$S_{B\perp} = B_{e\perp} / B_{i\perp} = \exp(-7z/D), \quad (4)$$

и для продольного МП:

$$S_{B\parallel} = B_{e\parallel} / B_{i\parallel} = \exp(-4.5z/D), \quad (5)$$

Видно, что проникающее поле через открытый конец экрана уменьшается экспоненциально в зависимости от расстояния  $z$ , отсчитываемого вдоль оси экрана от края цилиндра. Причем, поперечное поле на расстоянии от края, равном диаметру цилиндра ( $z = D$ ), ослабляется примерно в 1000 раз, а продольное – в 90 раз.

Таким образом, магнитная индукция результирующего МП в экране является векторной суммой индукций МП, проникающего через стенку поля и МП, проникающего через открытый конец экрана.

Для дальнейшего повышения экранирования используют многослойные концентрические экраны, выполненные из более тонкого материала (обычно толщиной порядка 1 – 2 мм) и разделенные воздушными зазорами. Полный коэффициент экранирования поперечного МП в этом случае равен:

$$S_{B\perp} = S_{1\perp} + S_{2\perp} + S_{3\perp} + \dots + \{S_{1\perp} \times S_{2\perp} \times S_{3\perp} \times \dots \times [1 - (A_1/A_2)] \times [1 - (A_2/A_3)] \dots\}, \quad (6)$$

где  $S_{i\perp}$  – коэффициент экранирования для  $i$ -го цилиндра, определенный выражением (1), а  $A_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -ого цилиндра, причем  $A_i < A_{i+1}$ .

В случае бесконечно малых зазоров между цилиндрами для коэффициента экранирования получим выражение:

$$S_{B_{\perp}} = \sum_i S_{i_{\perp}}, \quad (7)$$

а при достаточно больших зазорах

$$S_{B_{\perp}} = \prod_i \{S_{i_{\perp}} [1 - (A_i/A_{i+1})]\}, \quad (8)$$

Подобные соотношения справедливы и для коэффициентов экранирования продольного МП.

Обычно на практике используют концентрические цилиндры одинаковой толщины, разделенные зазорами толщиной 0.5-0.7 см.

Второй важной характеристикой ферромагнитного экрана является коэффициент ослабления. Он равен отношению величины постоянного внешнего МП  $B_e$  и величины постоянного остаточного поля  $B_i$ , измеренной в центре рабочего объема:

$$k = B_e/B_i, \quad (9)$$

Для продольной и поперечной компонент поля коэффициента ослабления в центре рабочего объема экрана равны соответственно:

$$k_{\parallel} = B_{e\parallel}/B_{i\parallel}, \quad (10) \quad \text{и} \quad k_{\perp} = B_{e\perp}/B_{i\perp}, \quad (11)$$

Таким образом, в ферромагнитных экранах, например, длиной  $L = 1$  м и диаметром  $D = 0.4$  м коэффициент ослабления ГМП составляет приблизительно 1000, т.е. остаточное поле внутри экрана составляет 50 нТл.

Абсолютная однородность остаточного МП  $\Delta B_{\perp 1}$  (градиент поля вдоль оси) характеризует пространственное изменение индукции МП на единицу длины и равно, согласно [3]:

$$\Delta B_{\perp 1} = (B_{\perp 2} - B_{\perp 1})/l_{12}, \quad (12)$$

где  $l_{12}$  – расстояние между точками 1 и 2, в которых магнитная индукция равна соответственно  $B_{\perp 1}$  и  $B_{\perp 2}$ .

Реальные значения  $\Delta B_{\perp 1}$ , полученные в ферромагнитных экранах равны приблизительно 4 нТл/м для поперечной и 20 нТл/м для продольной компонент МП [4].

Относительная однородность остаточного МП равна отношению абсолютной однородности поля к среднему значению магнитной индукции остаточного поля  $B_{\perp}$  [3].

$$\delta B_{\perp} = \Delta B_{\perp 1}/B_{\perp}, \quad (13)$$

В реальных ферромагнитных экранах она может достигать величины 0.1 – 0.01 [2, 4].

Ферромагнитные экраны имеют большое преимущество по сравнению с кольцами Гельмгольца, применяемыми многими авторами, не только потому, что в них можно получить гораздо более низкое остаточное МП и снизить шумы ГМП, но и потому, что для эффективного ослабления постоянной составляющей ГМП их не требуется размещать в высоко однородном ГМП. Кроме того, область однородности МП в ферромагнитных экранах существенно больше, чем при применении колец Гельмгольца таких же размеров.

## 2. Средства измерения и контроля характеристик слабых и сверхслабых МП.

Измерения шумов и постоянной составляющей ГМП проводились в лаборатории и внутри экранов.

Для измерения в области низких частот, использовали однокомпонентный и двухкомпонентный феррозондовые магнитометры, позволяющие одновременно производить измерение двух взаимно перпендикулярных проекций вектора МП, например, вертикальную и одну из горизонтальных составляющие ГМП и гипомангнитное поле внутри пермаллового экрана. Порог чувствительности магнитометров составляет 1 нТл по каждой компоненте в диапазоне от 0 Гц до 100 Гц, точность измерения  $\pm 3\%$ . Сигнал с магнетометра подавался на анализатор спектра, что позволяло одновременно с измерениями постоянных составляющих измерять шумы ГМП в области низких частот: от  $10^{-4}$  Гц до 100 Гц.

Измерения ГМП в области высоких частот проводились в лаборатории и большой экранирующей камере, выполненной из двухслойного железа «Динамо», с помощью измерительной катушки со следующими характеристиками: 500 витков, внутренний диаметр 10 см, внешний – 10.6 см совместно с селективным усилителем У2-8. Диапазон измерения шумов ГМП составил от 16 Гц до  $10^5$  Гц.

## 3. Установка для биологических исследований в условиях экранированного геомагнитного поля.

Применяемая установка состояла из большой камеры с размерами  $3 \times 2 \times 2$  м<sup>3</sup>, выполненной из двухслойного железа «Динамо», в центре которой располагался пермалловый экран в виде полого цилиндра без дна (рис. 1).

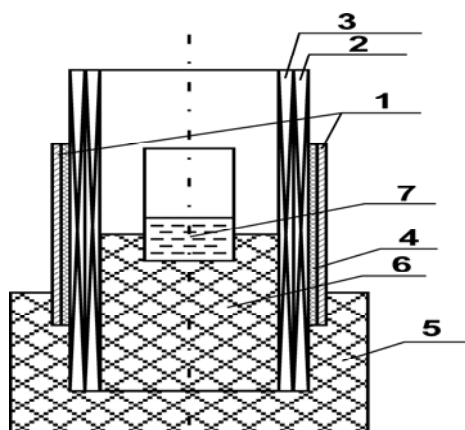


Рис. 1. Схема установки, помещенной в большую камеру : 1 – пермалловый экран, 2 – внешняя обмотка соленоида, запитываемая от генератора электрических сигналов, служащая для создания переменного МП, 3 – внутренняя обмотка соленоида, запитываемая от источника постоянного тока, служащая для создания постоянного МП, 4 – центрирующее кольцо из пенопласта, 5 – подставка из пенопласта, 6 – держатель образца из пенопласта, 7 – исследуемый биологический образец.

Комбинированное магнитное поле создается двумя коаксиальными соленоидами, помещенными внутрь пермаллового экрана.

Измерение коэффициента экранирования большой камеры по магнитному полю  $S_B$ , выполненной из трансформаторного железа, ввиду небольшой величины  $S_B$ , можно было произвести непосредственно экспериментальным путем. Для этого измеряли вначале величину ГМП вне камеры, а затем внутри камеры. Измерения производились как с помощью феррозондового магнитометра, так и с помощью индукционной катушки. Результаты измерений представлены на Рис. 2 (кривая С). Если поделить значение магнитной индукции вне камеры на значение магнитной индукции внутри камеры, то получим численное значение коэффициента экранирования МП на данной частоте  $f$ . Эти данные приведены в таблице 1.

**Таблица 1.  
Зависимость коэффициента экранирования  $S_B$  большой камеры, выполненной из двухслойного железа «Динамо» от частоты переменного магнитного поля (ПеМП)**

$f, \text{Hz}$	$U_1$	$U_2$	$S_B$	$f, \text{Hz}$	$U_1$	$U_2$	$S_B$	$f, \text{Hz}$	$U_1$	$U_2$	$S_B$
16	84	23	3,7	70	58	24	2,4	125	13	6	2,2
20	63	26	2,4	75	47	17	2,8	130	14	9	1,6
25	56	29	1,9	80	40	16	2,5	152	127	92	1,4
30	87	34	2,6	85	31	13	2,4	160	18	18	1,0
35	87	38	2,3	90	27	10	2,7	200	4	4	1,0
40	135	50	2,7	95	19	5	3,8	250	5	5	1,0
45	240	100	2,4	100	20	7	2,9	255	11	6	1,8
50	1217	487	2,5	102	22	8	2,8	350	3	3,5	0,9
51	4117	1784	2,3	105	17	6	2,8	400	2,2	2	1,1
55	381	178	2,1	110	16	6	2,7	500	1	1	1,0
60	144	65	2,2	115	22	8	2,8	700	1,1	1	1,1
65	79	60	1,3	120	15	6	2,5				

Для малой камеры, выполненной из пермаллоя, в диапазоне низких частот значение коэффициента экранирования МП определялось таким же способом. Однако для более высоких частот измерение коэффициента экранирования производилось следующим образом.

Малый пермалловый экран помещался в соленоид, через который пропускали максимально возможный электрический ток заданной частоты. В катушке индукции, помещенной сначала в соленоид без малого экрана, измеряли на этой же частоте индуцированное напряжение  $U_1$  на этой же частоте. Затем в соленоид помещали экран, внутрь которого помещали ту же индукционную катушку, и вновь измеряли индуцированное напряжение  $U_2$ . Отношение  $U_1/U_2$  дает коэффициент экранирования пермаллового экрана на данной частоте. Эти данные приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Зависимость продольного  $S_{В11}$  и поперечного  $S_{В\perp}$  коэффициентов экранирования пермалловым экраном ПемП, коэффициента экранирования экраном ПеЭП  $S_E$ , глубины проникновения  $\delta$  ЭМП в пермаллой и волнового сопротивления пермаллоя  $Z_{Спермаллоя}$  от частоты  $f$  внешнего по отношению к пермаллою ЭМП

f, Гц	$S_{В11}$	$S_{В\perp}$	$S_E$	$\delta$ , м	$Z_{Спермаллоя}$ , Ом
20	51	150	$3.8 \cdot 10^6$	$8.6 \cdot 10^{-4}$	$9.9 \cdot 10^{-4}$
30	54	152	$4.7 \cdot 10^6$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
40	57	172	$7.1 \cdot 10^6$	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$
50	69	200	$9.6 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$
60	76	225	$1.2 \cdot 10^7$	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
70	84	252	$1.3 \cdot 10^7$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$
80	86	257	$1.6 \cdot 10^7$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$
90	87	260	$1.9 \cdot 10^7$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
100	87	260	$2.7 \cdot 10^7$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
120	91	268	$3.3 \cdot 10^7$	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$
130	96	288	$3.7 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$
140	100	260	$4.8 \cdot 10^7$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
150	105	235	$6.5 \cdot 10^7$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
170	108	207	$7.3 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$
200	120	213	$1.1 \cdot 10^8$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$
250	150	249	$1.3 \cdot 10^8$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$
350	210	274	$2.6 \cdot 10^8$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$
450	305	376	$3.4 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
500	320	320	$3.4 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
550	350	296	$4.7 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
600	400	316	$4.7 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
650	440	391	$3.4 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
1000	1380	815	$2.5 \cdot 10^8$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$
2000	5250	8580	$1.3 \cdot 10^9$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$
4000	9600	21070	$3.0 \cdot 10^9$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$
9000	12700	29800	$5.3 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$
10000	13500	34360	$5.5 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$
20000	7100	8810	$3.9 \cdot 10^{10}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-3}$
30000	3300	4520	$2.2 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$6.2 \cdot 10^{-3}$
40000	2650	3170	$5.8 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$
50000	1930	1900	$5.5 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$7.2 \cdot 10^{-3}$
60000	450	370	$3.7 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$
70000	390	210	$3.7 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-3}$
80000	305	192	$3.7 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-3}$
90000	230	190	$3.8 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$

Магнитный шум малого пермаллового экрана вычислялся путем деления амплитуды магнитного шума внутри большого экрана на коэффициент

экранирования малого экрана на этой частоте. Полученные данные приведены на Рис. 2 (кривая Е).

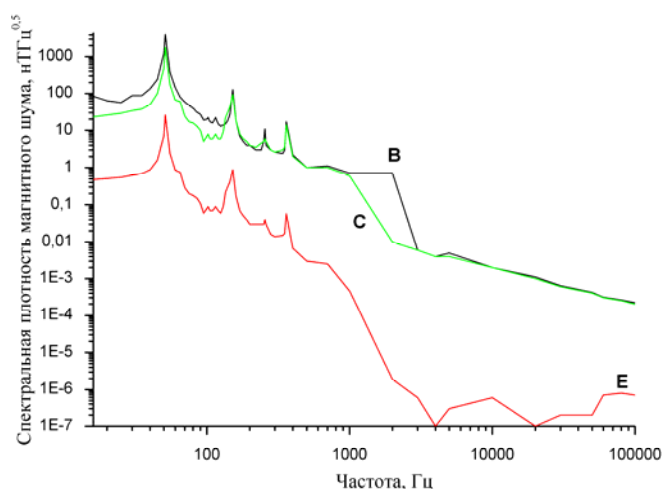


Рис. 2. Зависимость магнитного шума лаборатории от частоты (кривая В), зависимость магнитного шума внутри большой камеры от частоты (кривая С), зависимость магнитного шума внутри пермаллового экрана от частоты (кривая Е).

Окончательная характеристика зависимости спектральной плотности магнитного шума от частоты внутри пермаллового экрана, помещенного в большую камеру, приведена на Рис. 3.

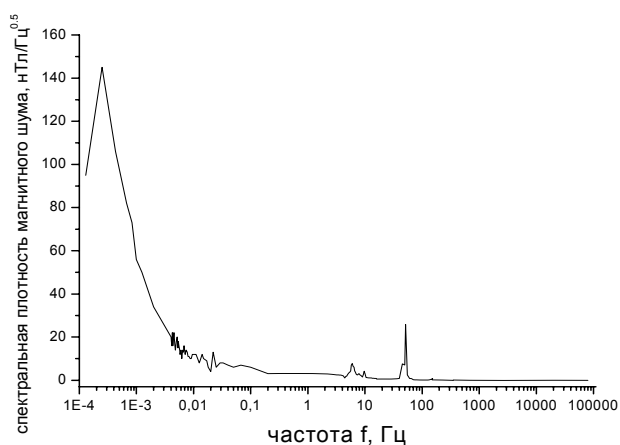


Рис. 3. Зависимость амплитуды спектральной плотности магнитного шума от частоты для пермаллового экрана, помещенного внутрь большой камеры, выполненной из двухслойного железа «Динамо».

Постоянная составляющая остаточного ГМП внутри пермаллового экрана была измерена непосредственно с помощью феррозондового магнитометра. Распределение остаточного ГМП внутри экрана представлено на Рис. 4.

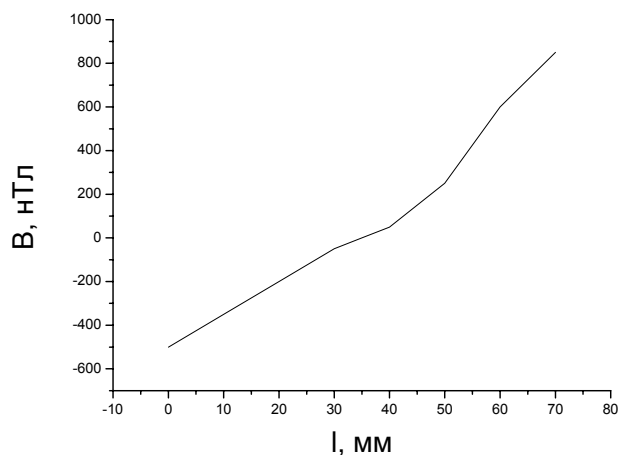


Рис. 4. Распределение остаточного ГМП в пермалловом экране вдоль оси экрана.

Из Рисунка 4 хорошо видно, что при расстоянии от центра пермаллового экрана  $\pm 15$  мм от центра (вверх-вниз), коэффициент ослабления постоянной составляющей ГМП равен  $-70$ , при расстоянии  $\pm 10$  мм  $-105$ , при расстоянии  $\pm 0.5$  мм  $-250$ .

#### 4. Связь магнитных шумов экрана с шумами электрического поля и вычисление коэффициента экранирования электрического поля.

В Таблице 1 приведены экспериментальные значения коэффициентов экранирования по продольной  $S_{B\parallel}$  и по поперечной составляющей  $S_{B\perp}$  в зависимости от частоты ПеМП. Видно, что они при низких частотах вблизи промышленной частоты 50 Гц имеют невысокие значения, что связано с большой глубиной проникновения  $\delta$  электромагнитного поля (ЭМП) в стенку пермаллового экрана, вычисленной по формуле [5]

$$\delta = (2 / \omega \mu_0 \mu \sigma)^{0.5}, \quad (14)$$

Здесь  $\omega$  – круговая частота ПеМП ( $\omega=2\pi f$ );  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость пермаллоя, зависящая от частоты ПеМП [2];  $\sigma$  – удельная проводимость пермаллоя, равная  $1.54 \cdot 10^6$  Ом $^{-1}$ /м $^{-1}$ . С возрастанием частоты  $f$  глубина проникновения  $\delta$  уменьшается. Таким образом, коэффициент экранирования растет до тех пор, пока с увеличением частоты не начинает падать магнитная проницаемость  $\mu$  [6] (рис. 5). Здесь необходимо отметить, что начальное значение  $\mu_0 = 12000$ , но максимальное может достигать 62000. Поэтому все расчеты могут иметь коэффициент порядка



$(\mu / \mu_0)^{0.5}$ , т.е. отличаться в 2.2 раза, но это не принципиально. Порядок величин определяется правильно, ход зависимостей также не изменяется.

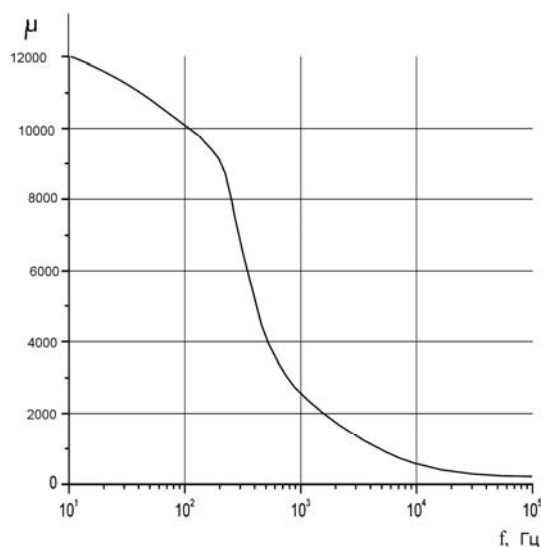


Рис. 5. Зависимость магнитной восприимчивости пермаллоя  $\mu$  от частоты  $f$  [6].

По известной (измеренной непосредственно) спектральной плотности магнитного шума внутри экрана, используя известную связь между векторами электрической напряженности  $E$  и магнитной напряженности  $H$  ЭМП внутри экрана, была вычислена спектральная плотность переменного электрического поля (ПеЭП) внутри экрана. Между напряженностью магнитного поля  $H$  и напряженностью электрического поля  $E$  связь определяется формулой

$$E_{\perp} = H_{\parallel} (\omega \mu_0 \mu / 2\sigma)^{0.5}, \quad (15)$$

где  $E_{\perp}$  – поперечная компонента переменного магнитного поля в экране,  $H_{\parallel}$  – продольная компонента ПеМП в экране,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость пермаллоя,  $\sigma$  – удельная проводимость пермаллоя.

На Рис. 6 (кривая С) приведено расчетное значение спектральной плотности  $g_E^{0.5}$  ПеЭП в рабочем объеме пермаллового экрана. Видно, что она имеет максимумы на тех же частотах, что и спектральная плотность ПеМП  $g_H^{0.5}$  (рис.2). На частотах 50 Гц  $g_E^{0.5}$  максимальна и достигает значения  $2.4 \cdot 10^{-5}$  В/м.

Коэффициент экранирования экраном ПеЭП  $S_E$  рассчитывается по формуле из [5]:

$$S_E = (\exp d / \delta) Z_{\text{Своздуха}} / Z_{\text{Сметалла}}, \quad (16)$$

где  $d$  – толщина стенки экрана,  $\delta$  – глубина проникновения ЭМП в стенку пермаллового экрана (таблица 2).  $Z_{C \text{ воздуха}}$  – волновое сопротивление воздуха, равное 377 Ом.

$Z_{C \text{ металла}}$  – волновое сопротивление металла экрана (пермаллоя), равное:

$$Z_{C \text{ металла}} = (\omega \mu_0 \mu / \sigma)^{0.5}, \quad (17)$$

В Таблице 2 приведено рассчитанное по формуле (17) значение  $Z_{C \text{ металла}}$  для пермаллоя, а также коэффициент экранирования экраном ПеЭП  $S_E$ . На Рис. 6 (кривая D) представлена спектральная плотность ПеЭП внутри большой камеры, полученная путем умножения спектральной плотности в экране на соответствующий коэффициент экранирования ПеЭП, в зависимости от частоты поля.

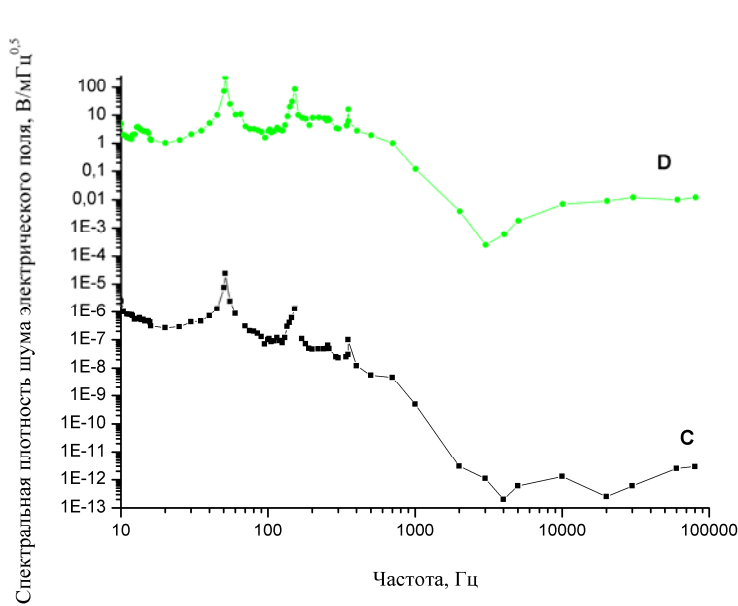


Рис. 6. Зависимость спектральной плотности шумового электрического поля в экране (C – нижняя кривая) и в большой камере (D – верхняя кривая).

Статическое электрическое поле (СЭП) внутри экрана в его рабочем объеме рассчитывалось из следующих соображений. Известно [7], что в отличие от ГМП, постоянная составляющая которого мало изменяется в течение большого промежутка времени, СЭП атмосферы Земли может изменяться даже в течение суток от 0 до 1000 В/м. В связи с вариабельностью СЭП атмосферы Земли мы рассчитывали среднее значение СЭП в рабочем объеме пермаллового экрана из среднего значения СЭП атмосферы Земли, равного 120 В/м.[7-9] путем деления его на коэффициент ослабления СЭП пермаллового экрана, полученный из соотношения [10]:

$$K_E = \exp 2.4 L_1 / R_0, \quad (18)$$

где  $L_1$  – длина внутреннего цилиндра экрана (рис. 1),  $R_0$  – радиус внутреннего цилиндра экрана. Для наших габаритов экрана  $K_E = 5 \cdot 10^6$ . Предварительное экранирование приблизительно в 20 раз осуществляется большой камерой, выполненной из двухслойного железа «Динамо».

Кроме того, в помещении лаборатории и большой экранирующей камере были произведены измерения естественного радиационного фона с помощью радиометра бета-гамма излучения РКС-20.03 «Припять». Величина фона составила 10-15 мкР/ч, что соответствует норме. Различий естественного радиационного фона в лаборатории и большой экранирующей камере не выявлено.

### **ВЫВОД**

Описанный выше метод экранирования с использованием пермаллового экрана, позволяет получить крайне слабые магнитные и электрические поля в большом частотном диапазоне.

### **Список литературы**

1. Введенский В.Л. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм / В.Л. Введенский, В.Н. Ожогин. – М. : Наука. 1986. – 200 с.
2. Freake S.M Shielding of Low Magnetic Fields with Multiple Cylindrical Shells / S.M. Freake, T.L. Thorp // Rev. Sci. Instrum. – 1971. – V.42, № 10. – P. 1411–1413.
3. Бондаренко С.И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях / С.И. Бондаренко, В.И. Шеремет. –Л. : Энергоиздат. –1982. – 126 с.
4. Доломанский Ю.К. Цилиндрический магнитный экран / Ю.К. Доломанский // ПТЭ. – 1983. – №3. – С. 151–153.
5. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / Волин М.Л. : [2-е изд. перераб. и доп.]. – М. : Радио и связь. – 1981. – 296с.
6. Таблицы физических величин. Справочник : [ Под ред. акад. И.К. Кикоина]. – М.: Атомиздат. – 1976. – 1008 с.
7. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения / Красногорская Н.В. – Л. : Гидрометеиздат. – 1972. – 98 с.
8. Красногорская Н.В. Электрические поля атмосферы Земли и их природа / Н.В. Красногорская, Л.А. Похмельных // В кн.: Электромагнитные поля в атмосфере. – Т. 1. Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их значение. – М. : Наука. – 1984. – С.54–56.
9. Красногорская Н.В. О некоторых результатах измерений вариаций электрического поля Земли / Н.В. Красногорская, В.П. Ремизов // ДАН СССР. – 1973. – Т.212, № 2. – С. 345–348.
10. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи / Каден Г. – М.-Л. ; Госэнергоиздат. – 1957. – 327с.

**Богатина Н.І. Метод створення дуже слабких постійного магнітного та електричного полів та добре відтвореного комбінованого магнітного поля для біологічних досліджень / Н.І. Богатина, Н.В. Шейкіна, В.С. Мартинюк [та ін.] // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2010. – Т. 23 (62). – № 2. – С. 54-65.**

У роботі описана методика створення, вимірювання та обчислення дуже слабких магнітних та електричних полів, які були отримані за допомогою пермаллового екрану. Вивірени їх магнітні шуми, розраховані шуми електричного поля та коефіцієнти екранування та послаблення магнітного та електричного полів в робочому об'ємі.

**Ключові слова:** екранування магнітних та електричних полів, пермаллові екрани, магнітні шуми, шуми електричного поля.

**Bogatina N.I. The method of creation of very weak static magnetic and electric fields and well reproducible combined magnetic field for biological investigation / N.I. Bogatina, N.V. Sheykina, V.S. Martynyuk [et al.] // Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2010. – V.23 (62). – № 2. – P. 54-65.**

The method of creation, measurement and calculation of very weak magnetic and electric fields that were obtained by means of  $\mu$ -metal shield was described. The magnetic field noise was measured and electric field noise was calculated. The coefficients of magnetic and electric fields weakening and shielding in the work volume were measured and calculated.

**Keywords:** magnetic and electric field shielding,  $\mu$ -metal shields, magneticfield noise, electric field noise.

*Поступила в редакцию 14.05.2010 г.*