

10068

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10068

УКЗ. ЧИТ. ЗАДА

P13 - 10068

Ю.В.Никитенко, Ю.В.Таран

ПЯТИСЛОЙНЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ЭКРАН
ОБЪЕМОМ $1,5 \text{ м}^3$
III. Коэффициент экранирования

1976

P13 - 10068

Ю.В.Никитенко, Ю.В.Таран

ПЯТИСЛОЙНЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ЭКРАН
ОБЪЕМОМ 1,5 м³

III. Коэффициент экранирования

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах^{/1,2/}, далее обозначаемых как части I и II, были описаны конструкция и результаты некоторых магнитных измерений в пятислойном цилиндрическом пермалловом экране с внутренним объемом около 1,5 м³, сооруженном в ЛНФ ОИЯИ для защиты установки "Тристом" от геомагнитного поля (ГМП) и помех низкой частоты. В этой установке, предназначенной для измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона с помощью поляризованных ультрахолодных нейтронов (УХН), предъявляются достаточно высокие требования к стабильности магнитного поля.

Используя результаты работ^{/3,4/}, сформулируем требования на стабильность магнитного поля в установке и отсюда определим нижнее значение коэффициента экранирования, которым должен обладать экран. В установке "Тристом" один цикл измерения ЭДМ длительностью Δt_c около 2 мин состоит из двух идентичных полуциклов, отличающихся только знаком электрического поля. Ошибка в определении ЭДМ в некотором j -цикле равна:

$$\Delta D_j = \sqrt{(\Delta D'_j)^2 + (\Delta D''_j)^2}, \quad (1)$$

где $\Delta D'_j$ – статистическая ошибка, $\Delta D''_j$ – ошибка, вызванная нестабильностью магнитного поля H^* .

Если обеспечить такую стабильность ΔH , чтобы выполнялось условие $\Delta D''_j \leq \frac{1}{3} \Delta D'_j$, то полная ошибка измерения будет отличаться от статистической не более чем на 5%. Пользуясь выражением для чувствительности установки "Тристом" $\Delta D = 7 \cdot 10^{-3} / (j_{\max} \cdot \Delta t_c \cdot n_0)^{1/2} \cdot (10^{15} E)$ и соотношениями $\Delta D'_j = j_{\max}^{1/2} \Delta D$ и $\Delta D''_j = (2,92 \cdot 10^3 \cdot \Delta H) / (10^{15} E)$, получим $\Delta H \leq 7 \cdot 10^{-8} / n_0^{1/2} j_{\max}$ (здесь: j_{\max} – полное число циклов, n_0 – число УХН в 1 см^3 на входе в установку, E – напряженность электрического поля в в.см^{-1} , H – в эрстедах). Ожидаемое значение n_0 на канале УХН реактора ИБР-2^{/6/} равно $\approx 1 \text{ см}^{-3}$. В этом случае в установке должна быть обеспечена абсолютная стабильность магнитного поля не хуже $0,01 \gamma$.

Вариации ГМП лежат в диапазоне $10-1000 \gamma$, причем в диапазоне $100-1000 \gamma$ они бывают в среднем около 10 дней в году. Магнитный экран должен ослаблять эти изменения магнитного поля в 10^3-10^5 , чтобы обеспечить требуемую стабильность. При наличии в установке системы стабилизации магнитного поля требования на коэффициент экранирования могут быть понижены. В установке "Тристом" предусмотрена система стабилизации с динамическим диапазоном $\approx 1 \gamma$. Тогда магнитный экран установки должен иметь коэффициент экранирования к изменению магнитного поля $\approx 10^3$.

В настоящей работе описаны результаты измерений эффективности магнитного экрана установки "Тристом". Эффективность экрана характеризуется следующими величинами:

а) нормальным коэффициентом экранирования (КЭ) κ , определяемым как отношение внешнего однородного

* Здесь учитывается нестабильность, носящая флуктуационный характер. Нестабильность дрейфового типа может быть исключена особой процедурой обработки экспериментальных данных (см., например, ^{/5/}).

постоянного магнитного поля H_e , наложенного перпендикулярно оси размагниченного в отсутствие внешнего поля экрана, к полю H_i внутри экрана (если внутри размагниченного экрана, находящегося в нулевом поле, имеется остаточное поле, то оно должно быть учтено);

б) дифференциальными КЭ возрастания κ_{d+} и убывания κ_{d-} , определяемыми как пределы отношений $\Delta H_e / \Delta H_i$ и $(-\Delta H_e) / -\Delta H_i$ при $\Delta H_e \rightarrow 0^*$; в нулевом поле $\kappa_{d+} = \kappa_{d-} = \kappa$; коэффициенты $\kappa_{d\pm}$ определяют эффективность экранировки от медленных изменений внешнего магнитного поля.

Измерения κ , $\kappa_{d\pm}$ были проведены с использованием пары катушек, создававших магнитное поле, направленное вдоль ГМП, как, например, было сделано в работе ^{/8/}, и с помощью линейного проводника по методу, описанному в ^{/9/}. Для оценки КЭ вдоль оси экрана использовался кольцевой виток, соосный с магнитным экраном.

2. АППАРАТУРА

1. Магнитометр. Магнитное поле измерялось с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра с чувствительностью $\approx 0,25 \gamma$ (более подробное описание дано в частях I и II).

2. Система циркулярного размагничивания. Описание дано в части I. Воспроизводимость результатов измерений получалась только тогда, когда экран находился в одинаковом исходном состоянии,

* При изменении внешнего поля в пределах $\Delta H_e = H_{e2} - H_{e1}$ поле внутри экрана H_i должно изменяться по частному циклу (ЧЦ), аналогичному частному несимметричному циклу гистерезиса ^{/7/}. На ЧЦ можно определить средний КЭ $\bar{\kappa}$ как отношение $(H_{e2} - H_{e1}) / (H_{i2} - H_{i1})$. При $\Delta H_e \rightarrow 0$ средний КЭ $\bar{\kappa}$ переходит в κ_{d-} .

поэтому после каждого измерения экран размагничивался в "нулевом" поле.

3. Изогнутые прямоугольные катушки (ИПК). Для компенсации ГМП и для создания различных значений внешнего магнитного поля использовалась пара прямоугольных катушек, изогнутых по несущему корпусу экрана (рис. 1). Описание и расчет

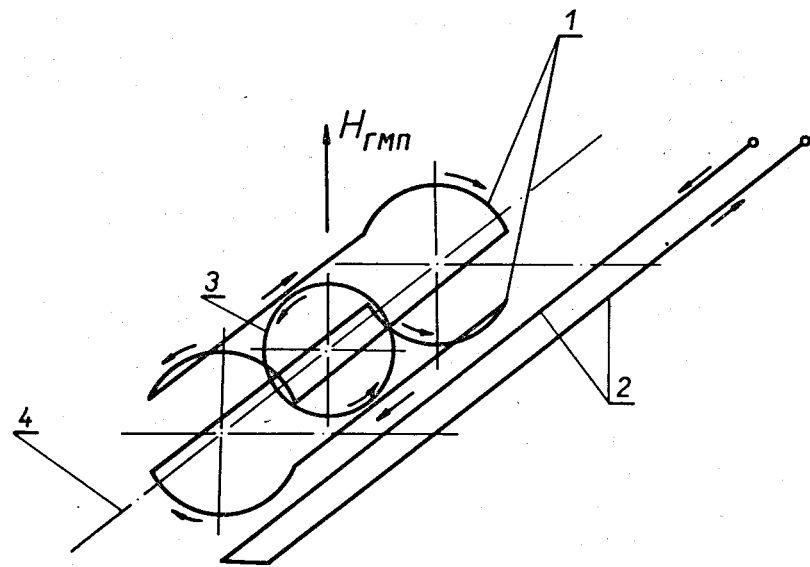


Рис. 1. Расположение изогнутых прямоугольных катушек (ИПК) 1, двухпроводной линии (ДПЛ) 2 и кругового витка (КВ) 3 относительно оси 4 магнитного экрана (последний не показан).

таких катушек даны в работе /10/. При заданных длине корпуса $L = 2,22$ м и его радиусе $R = 0,79$ м и, тем самым, размерах катушек был рассчитан оптимальный угол раствора ϕ катушек (обозначения см. в /10/), оказавшийся равным 140° . ИПК были смонтированы на корпусе экрана соосно с вектором ГМП,

направленного под углом 20° к вертикали в лабораторном помещении, в котором был установлен экран. Постоянная катушек, рассчитанная для их центра, была равна $0,388$ Э/А. Среднеквадратичная неоднородность $\sqrt{H_x^2 - (\bar{H}_x)^2}$ компоненты H_x магнитного поля вдоль оси катушек по объему цилиндра длиной $2,22$ м и радиусом $0,7$ м (этот объем занимает собственно магнитный экран) была равна $\approx 33\%$, при этом соответствующая постоянная - $0,373$ Э/А.

4. Двухпроводная линия (ДПЛ). Так как катушки дают сильно неоднородное поле, то для оценки влияния его неоднородности на результаты измерений внешнее магнитное поле также создавалось пропусканием постоянного тока по двухпроводной линии (рис. 1). В работе /9/ было показано, что КЭ, измеренный с помощью такой линии на оси экрана, совпадает с КЭ для однородного поля. ДПЛ была расположена в плоскости, проходящей через ось экрана перпендикулярно ГМП, на расстоянии $0,89$ м (ближний провод) от оси. Расстояние между проводами было равно $0,2$ м. Длина линии была около 8 м, так что краевые эффекты были достаточно малы. В качестве источника тока была использована система для размагничивания экрана, на выходе которой включался выпрямитель на четырех тиристорах. Постоянная ДПЛ, рассчитанная относительно оси экрана, была равна 41γ /А.

5. Круговой виток (КВ). Для оценки КЭ вдоль оси экрана использовался круговой виток, намотанный на корпусе экрана в плоскости, проходящей через его центр. Постоянная КВ относительно его центра была равна $2,864$ Э/А.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Измерения с ИПК. На рис. 2 представлены петли частных циклов, полученные с помощью измене-

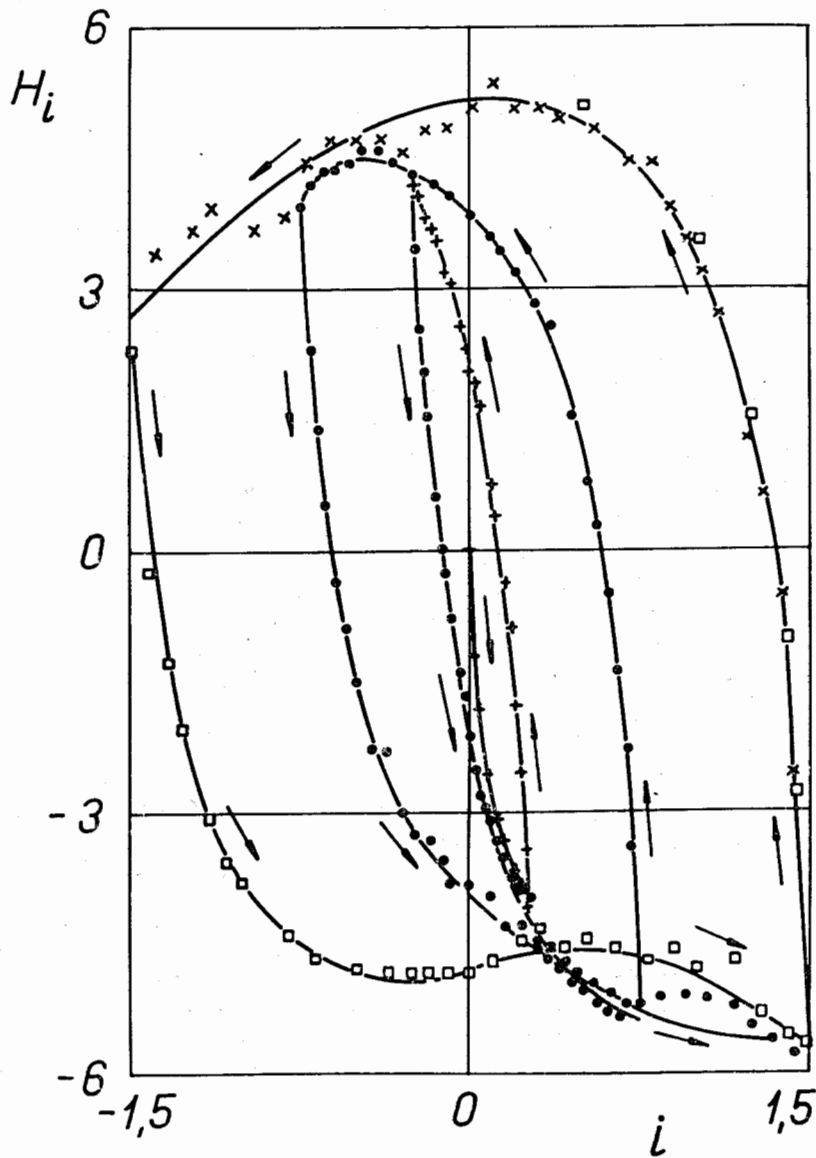


Рис. 2. Петли частных циклов экрана, размагниченного при токе в ИПК $i=0$. Остаточное поле в центре экрана было равно $|H_r| = 4y$, его компонента вдоль оси ИПК $|H_{r||} = 3y$.

ния тока i в ИПК в пределах $\Delta i = i_{\max} - i_{\min}$ *. Экран перед началом измерений размагничивался в ГМП ($i=0$). При $i>0$ ($i<0$) поле от ИПК было параллельно (анти-параллельно) ГМП. До значений амплитуд ЧЦ $\Delta i \approx 1$ А петля обладала симметричной формой и заметно искажалась при больших значениях Δi .

Компенсация ГМП на оси ИПК достигалась при токе $i \approx -1$ А ("нулевое" поле). В этом случае петля ЧЦ сохраняла симметричную форму до значительно больших значений Δi . На рис. 3 приведена петля для $\Delta i = 2$ А ($i_{\max} = 0$, $i_{\min} = -2$ А). До начала измерений экран был размагничен при $i = -1$ А.

Выход на петлю из размагниченного состояния осуществляется по кривой $H_i(i)$ (кривая 1 на рис. 3), соответствующей основной кривой намагничивания экрана. Кривая $H_i(i)$ использовалась для нахождения нормально-го и дифференциального КЭ при различных значениях внешнего поля. Так, в ГМП κ оказался равным $\approx 8,3 \cdot 10^{3**}$, а в "нулевом" поле ≈ 740 (в этом случае $\kappa = \kappa_{d\pm}$).

Для определения КЭ убывания κ_{d-} при измерении зависимости $H_i(i)$ осуществлялись заходы в ЧЦ, что, например, демонстрируется на рис. 3 для $i=0$. При этом для каждой выбранной точки на кривой $H_i(i)$ снималась зависимость среднего КЭ $\bar{\kappa}$ ЧЦ от его амплитуды Δi , экстраполяция которой к нулю давала значение κ_{d-} (рис. 4). Выход из ЧЦ осуществляется на кривую $H_i(i)$, что, в частности, видно из рис. 2 и 3. Последнее обстоятельство давало возможность измерить зависимость κ_{d-} от i за один проход кривой $H(i)$. Измерения показали, что κ_{d-} слабо зависит от тока i : так, например, при $i = -1$ и 0 было найдено $\kappa_{d-} = 740$ и 660 , соответственно (рис. 4).

* По оси ординат отложены показания магнитометра H_i за вычетом остаточного поля H_r внутри экрана, измеренного сразу после размагничивания. Величина H_r лежала обычно в пределах $2 \div 4y$.

** Для вычисления КЭ всюду использовалась постоянная ИПК для их центра.

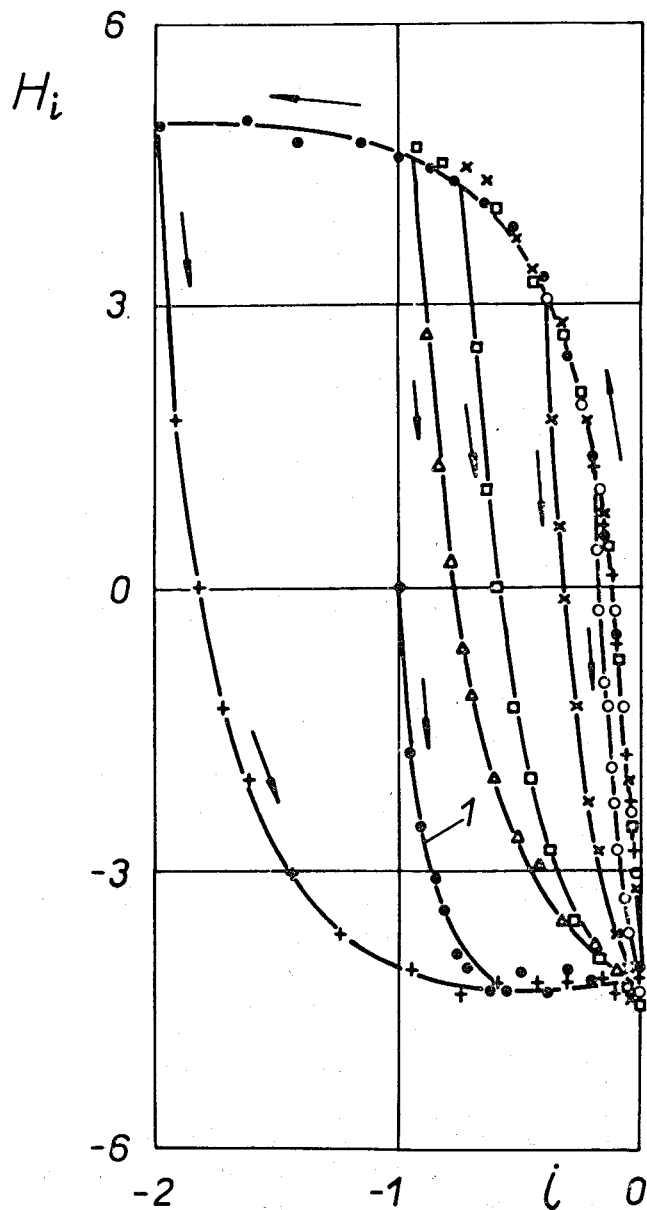


Рис. 3. Петли частных циклов экрана, размагниченного при $i = -1$ А. По кривой 1 осуществляется выход на петлю частного цикла.

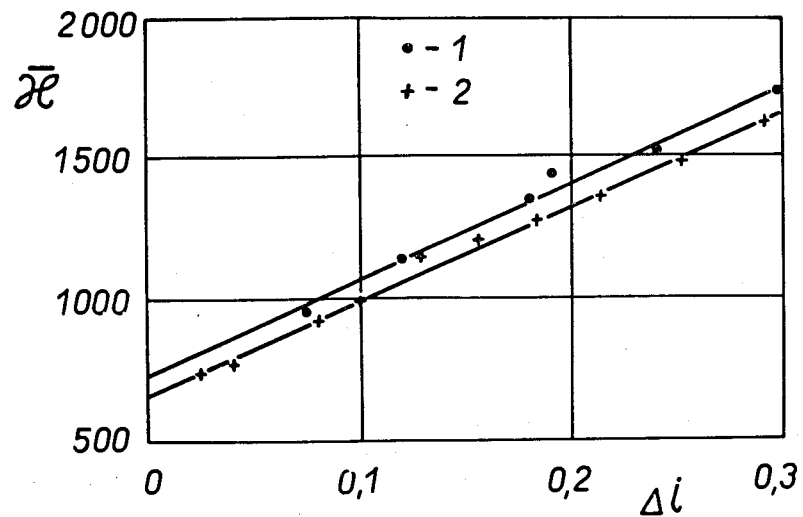


Рис. 4. Зависимость среднего по частному циклу коэффициента экранирования \bar{k} от амплитуды ЧЦ Δi (А): 1 - ток в ИПК $i = -1$ А ("нулевое" поле); экстраполированное к $\Delta i = 0$ значение \bar{k} равно 740; 2 - $i = 0$ (ГМП); экстраполированное значение - 660.

Так как κ_{d+} больше в ГМП, чем в "нулевом" поле, а κ_{d-} практически постоянная величина, то нецелесообразно компенсировать ГМП в объеме экрана, поэтому экран установки "Тристом" в дальнейшем будет использоваться без компенсирующей системы.

2. Измерения с ДПЛ. Измерения $\kappa_{d\pm}$ были повторены с помощью ДПЛ. Так как в этом случае можно было создать внешнее поле не более 0,05 Э (максимальный ток $J \approx 125$ А), то ДПЛ использовалась для захода в ЧЦ при движении по основной кривой $H_i(i)$, получаемой с помощью ИПК. Для "нулевого" поля (ток в ИПК $i = -1$ А) получено $\kappa = \kappa_{d\pm} \approx 680$, для ГМП $\kappa_{d-} \approx 580$, что в пределах 10% - точности согласуется с результатами измерений с помощью

ИПК. Отсюда можно сделать вывод, что в пределах указанной точности неоднородность поля, создаваемого ИПК, не играла существенной роли.

3. Измерения с КВ. Ранее (см. часть II) с помощью вращения экрана в горизонтальной плоскости в пределах $\pm 8^\circ$ относительно вертикальной оси, проходящей через его центр, был измерен продольный КЭ $k_{||}$, оказавшийся равным ≈ 240 . При этих же условиях в измерениях с КВ были получены значения $k_{||} \approx 80$ для тока в ИПК $i = -1$ А и $k_{||} \approx 70$ для $i = 0$, что дает поправочный множитель ≈ 3 для определения истинного значения $k_{||}$ в дальнейших измерениях с КВ.

4. Подмагничивание переменным магнитным полем (shaking-effect/II). Система циркулярного размагничивания экрана была использована для создания переменного магнитного поля постоянной амплитуды на экран. С помощью ИПК и КВ были исследованы зависимости КЭ k_{\perp} , $k_{d\perp}$ и $k_{||}$ от силы переменного тока i_n в токопроводе, состоявшем из трех отрезков цилиндрических алюминиевых труб (см. рис. 7 в части I). Центральная труба большего диаметра находилась внутри экрана. Ток в ней подводился через отверстия в торцах экрана по трубам меньшего диаметра, сваренным с центральной с помощью двух кольцевых дисков. Такая конструкция токопровода достаточно проста в изготовлении, позволяет вводить внутрь экрана измерительную аппаратуру без его разборки, обеспечивает подмагничивание всех слоев экрана одновременно, позволяет задавать внутри экрана в определенном объеме такой уровень переменного магнитного поля, который не являлся бы помехой для функционирования измерительной аппаратуры. Поясним последнее более подробно.

Известно, что внутри трубы бесконечной длины текущий по ней ток не создает магнитного поля. Проведенный анализ показал, что это справедливо и для многосекционной трубы. Для трубы конечной длины поле внутри существует, причем отлична от нуля только его азимутальная компонента H_ϕ , которая

в плоскости, проходящей через центр трубы ($z = 0$) перпендикулярно ее оси z , линейно зависит от радиуса r . Для использованного нами токопровода со следующими размерами: длина и диаметр центральной трубы 1,2 м и 0,77 м; диаметр подводных труб 16,5 см, расчетное значение поля равно $H_\phi = k i_n$, где $k(\ell)$ — функция длины ℓ подводной трубы. В табл. 1 представлена зависимость k от ℓ . Варьируя длину подводных труб, можно установить уровень переменного магнитного поля ниже заданного, не меняя условий для подмагничивания.

Таблица 1

ℓ , м	1	2	4	6	8	10
$k, \frac{\gamma}{\text{см} \cdot \text{А}}$	0,95	0,25	0,062	0,028	0,016	0,01

Так как среднее значение поля по некоторому соосному цилиндрическому объему равно нулю, то для характеристики уровня помехи удобно использовать его среднеквадратичное значение $(\overline{H_\phi^2})^{1/2}$. В частном случае, когда объем усреднения эквивалентен накопительной камере установки "Тристом" (цилиндр длиной 10 ÷ 15 см и диаметром 0,5 м), для использованного токопровода, имевшего $\ell \approx 1$ м, уровень помехи был равен $\approx 17 \gamma/\text{А}$. В установке "Тристом" переменный ток будет пропускаться по ее корпусу при длине подводных труб 2 ÷ 2,5 м, что дает приемлемый уровень помех $\approx 4 \gamma/\text{А}$.

На рис. 5 приведено семейство основных кривых намагничивания экрана $H_i(i)$, аналогичных кривой 1 на рис. 3 и полученных при различных значениях переменного тока i_n . Значения нормального КЭ,

полученные из этих данных, в нулевом поле и ГМП приведены в табл. 2. В частности, подмагничивание током в 1 А дало увеличение κ в ≈ 20 и ≈ 9 раз при $i = -1$ А и 0, соответственно. При $i_n > 3$ А чувствительности использованного магнитометра было недостаточно для измерения эффекта от включения внешнего поля напряженностью ≈ 1 Э.

Таблица 2

Нормальный коэффициент экранирования κ пятислоеного пермаллового экрана, подмагничиваемого переменным током i_n

i, A \ / \ i_n, A	0	$\approx 0,01$	$\approx 0,1$	1	3
-1	$7,4 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^4$
0	$8,3 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^5$

На рис. 6 построена зависимость продольного КЭ $\kappa_{||}$, измеренного с помощью КВ, от тока i_n . При $i_n = 3$ А достигнуто семикратное увеличение продольного КЭ. Результаты практически не зависят от внешнего поля.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

1. Измеренный нормальный КЭ κ для "нулевого" поля существенно меньше оценки $\approx 10^5$ (см. части I и II), полученной с использованием значения начальной магнитной проницаемости $\mu_0 = 49000$ из заводских испытаний поставленного проката. Принимая значения проницаемости для всех слоев одинаковой, получим экспериментальную оценку $\mu_0 \approx 17000$, что в ≈ 3 раза

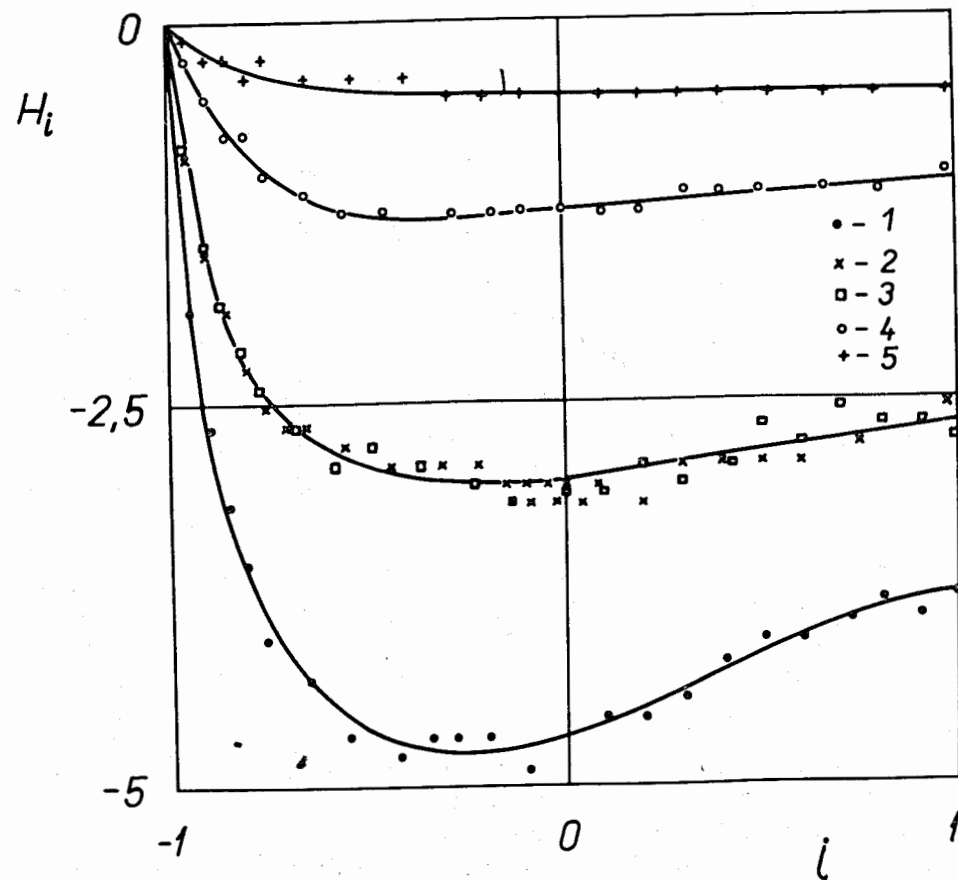


Рис. 5. Зависимость магнитного поля внутри экрана $H_i(\gamma)$ от тока i (А) в ИПК при различных значениях тока подмагничивания i_n : 1 - нет подмагничивания; 2 - $i_n \approx 0,01$ А; 3 - $i_n \approx 0,01$ А, повторный замер, демонстрируется достаточно хорошая воспроизводимость результатов; 4 - $i_n \approx 0,1$ А; 5 - $i_n = 1$ А. Экран размагничивался при $i = -1$ А.

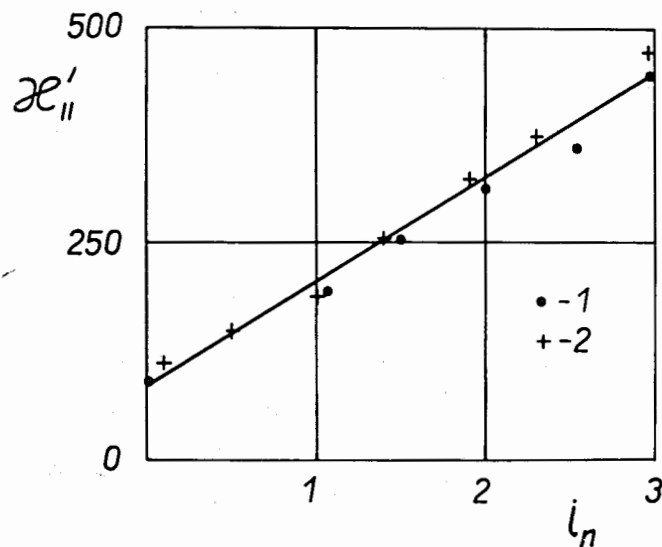


Рис. 6. Зависимость продольного коэффициента экранирования $\kappa'_{||}$ от тока подмагничивания i_n (А): 1 - ток в ИПК $i = -1$ А ("нулевое" поле); 2 - $i = 0$ (ГМП).

меньше контрольного значения. Возможными причинами такого ухудшения магнитных свойств пермаллоя в собранном экране могут быть:

- а) нагартовка при рихтовке деформированных во время отжига обечаек;
- б) недостаточная эффективность использованной конструкции для снятия механических напряжений;
- в) чрезмерная спрессовка вспененного полистирола при сборке экрана (часть I).

Первая причина может дать частичное объяснение эффекта, но количественно оценить ее вклад не представляется возможным, хотя мы верим, что он мал, так как рихтовке подвергались только края обечаек в пределах всего 20–25 см при общей длине ≈ 2 м. Вторая причина, по нашему мнению, не имеет оснований,

на что указывают оценки напряжений, приведенные в части I, и следующие дополнительные соображения.

Оценим максимально возможные напряжения в обечайке, исходя из величины критического напряжения деформации обечайки при равномерном сдвигании /12/:

$$\sigma_{кр} = \frac{Eh^2}{4(1-M)R^2}, \quad (2)$$

что для нашего случая: $E = 2 \cdot 10^4$ кг.мм⁻², $M = 0,33$, $h = 0,1$ см, $R \approx 50$ см, дает $\sigma_{кр} \approx 0,05$ кг.мм⁻². Известно, что при $\sigma \approx 0,075$ кг.мм⁻² магнитная проницаемость μ_0 ухудшается в 2,5–3,3 раза (см. часть I). Так как в экране заведомо $\sigma < \sigma_{кр}$, то возможное падение μ_0 не должно быть так велико. Сказанное одновременно относится и к третьей причине: чрезмерная спрессовка может лишь частично объяснить эффект. Истинная причина осталась невыясненной. К сожалению, до сборки и во время нее не было контроля за проницаемостью обечаек, хотя такой способ имеется.

2. На рис. 5 и 6 видно, что дифференциальный КЭ возрастания κ_{d+} растет до ∞ с увеличением внешнего поля и затем становится даже отрицательным. Такой ход κ_{d+} можно качественно понять на примере однослойного экрана.

Нормальный КЭ однослойного экрана с магнитной проницаемостью μ в поле H_e равен:

$$\kappa = \frac{H_e}{H_i} = k\mu, \quad (3)$$

где k - фактор, учитывающий геометрические размеры экрана. Дифференцируя ур. (3), получим:

$$\kappa_{d+} = \frac{dH_e}{dH_i} = \frac{\kappa}{1 - \frac{H_e}{\mu} \frac{d\mu}{dH_e}}. \quad (4)$$

Известно следующее соотношение между нормальной проницаемостью μ и дифференциальной проницаемостью возрастания μ_{d+} /7/:

$$\frac{d\mu}{dH_c} = \frac{\mu_{d+} - \mu}{H_c} \quad (5)$$

Подставляя ур. (5) в (4), получим:

$$\kappa_{d+} = \frac{\kappa}{2 - \frac{\mu_{d+}}{\mu}} \quad (6)$$

В "нулевом" поле, где $\mu_{d+} = \mu = \mu_0$, оба КЭ κ и κ_{d+} совпадают. До значения внешнего поля $H_c \approx (1,2 \div 1,4) H_c$, где H_c - коэрцитивная сила, μ и μ_{d+} сильно растут и при некотором H_c когда $\mu_{d+} = 2\mu$, функция $\kappa_{d+}(H_c)$ терпит разрыв: при $\mu_{d+} < 2\mu$ имеем $\kappa_{d+} > 0$, а при $\mu_{d+} > 2\mu$ будет $\kappa_{d+} < 0$. При дальнейшем росте H_c значения μ и μ_{d+} проходят через максимум и начинают падать, причем μ_{d+} уменьшается значительно быстрее, чем μ ; и при некотором H_c функция $\kappa_{d+}(H_c)$ снова терпит разрыв и далее всегда $\kappa_{d+} > 0$ с предельным значением $\frac{1}{2}\kappa$. В нашем эксперименте первый разрыв наблюдался в области полей $0,2 \div 0,25$ Э, область же второго разрыва не достигалась.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя эффективность экрана установки "Тристом" (без использования подмагничивания) близка к поставленным во введении требованиям, желательно иметь больший запас, особенно по дифференциальному коэффициенту экранирования убывания и продольному коэффициенту экранирования, если учитывать, в частности, возможность проведения эксперимента по поиску

ЭДМ нейтрона на высокопоточном реакторе, где увеличение потока по УХН влечет за собой повышение требования на стабильность магнитного поля. Проведенные измерения с подмагничиванием экрана и полученные результаты: увеличение поперечного и продольного коэффициентов экранирования в ≈ 40 и ≈ 7 раз, соответственно, при токе подмагничивания 3 А, обеспечивают такой запас до 100-кратного увеличения потока УХН.

Однако при использовании подмагничивания должны быть выполнены определенные требования на стабильность амплитуды переменного магнитного поля. Так, измерения с оптическим квантовым магнитометром, имевшим чувствительность $\approx 0,01\mu$, которые подтвердили приведенные выше результаты, показали, в частности, что осевая компонента рабочего магнитного поля практически линейно зависит от силы тока подмагничивания с постоянной $\approx 3\mu/A$. Отсюда стабильность тока подмагничивания должна быть лучше $\approx 3 \cdot 10^{-3}$ А, что для тока 3 А дает относительную стабильность $\approx 0,1\%$.

Авторы пользуются случаем, чтобы поблагодарить В.В.Голикова за проведение оценки плотности УХН, В.И.Константинова за полезные обсуждения и В.Б.Дучича за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.А.Алексеев, Б.И.Воронов, В.И.Константинов, Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ, Р13-9221, Дубна, 1975.
2. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ, Р13-9275, Дубна, 1975.
3. Ю.В.Таран. Депонированные публикации ОИЯИ, Б1-3-7151, 1973; Б1-13-8441, Дубна, 1974.
4. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ, Р3-8442, Дубна, 1974.
5. J. K. Baird. A Search for a Neutron EDM by the Method of Neutron Beam Magnetic Resonance, ORNL-TM-2308, Oak Ridge, 1969.
6. В.Д.Ананьев и др. Препринт ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.

7. И.И.Кифер. Испытания ферромагнитных материалов, изд. "Энергия", М., 1969.
8. П.С.Овчаренко. Геофизическая аппаратура, 56,126, изд. "Недра", Л., 1974.
9. Ю.В.Никитенко, Ю.В.Таран. Препринт ОИЯИ, Р13-10067, Дубна, 1976.
10. Ю.В.Никитенко, Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ, Р3-7379, Дубна, 1973.
11. D.Cohen. J.Appl. Phys., 38,1295,1967.
12. Справочник машиностроителя, 3, ГНТИ, М., 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 августа 1976 года.