

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗ44.1А

Т-19

17/11-73

РЗ - 7377

4532/2-73

Ю.В.Таран

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА НА УХН

1973

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

РЗ - 7377

Ю.В.Таран

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА НА УХН

1. ВВЕДЕНИЕ

В^{/1/} предложена принципиальная схема магнитного резонансного спектрометра на ультрахолодных нейтронах /УХН/ в накопительном варианте для экспериментального поиска электрического дипольного момента /ЭДМ/ нейтрона в диапазоне 10^{-23} - 10^{-25} см.

В^{/2/} производится выбор и обоснование численных значений параметров такого спектрометра /установка "Тристом"/, в том числе величины магнитного поля, его стабильности и однородности применительно к реактору ИБР-2. Цель настоящей работы заключалась в выборе и расчете магнитной системы установки с учетом следующих данных^{/2/}: среднее значение напряженности постоянного магнитного поля по объему накопительной камеры в виде цилиндра диаметром $D_k = 50$ см и длиной $h_k = 10$ см должно лежать в пределах $1000-2000$ γ / $1\gamma = 10^{-5}$ Э/; неоднородность магнитного поля, характеризующаяся среднеквадратичным отклонением $\sqrt{(\Delta H_0)^2}$ от среднего \bar{H}_0 , должна быть не хуже $2,5 - 3\%$.

Столь малое рабочее значение магнитного поля и жесткое требование на его абсолютную однородность с неизбежностью приводят к необходимости его экранировки от геомагнитного поля $(40\ 000 - 50\ 000 \gamma)$. Чтобы обеспечить однородность поля в пределах допуска надо иметь магнитный экран с коэффициентом ослабления поля K не менее $15\ 000$.

В настоящей работе описываются расчеты такого экрана, его моделирование в $1/4$ натуральной величины и результаты проведенных на нем магнитных измерений.

Для создания рабочего поля внутри экрана должна быть размещена подходящая система проводников тока. В работе описан выбор такой системы, ее расчет и определение ее оптимальных параметров.

2. МАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ

а/ Теория

Пусть в однородном магнитном поле \vec{H}_0 находится n -слойный цилиндрический экран из ферромагнитного материала бесконечной длины с осью, перпендикулярной \vec{H}_0 /рис. 1/. Все пространство разделим на $N=2n+1$ об-

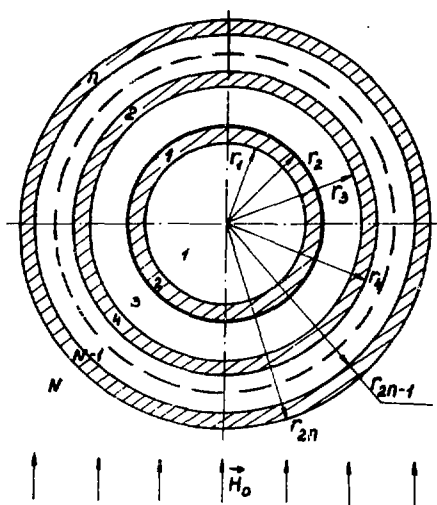


Рис. 1. Поперечный разрез n -слойного магнитного экрана.

ластей. Коэффициент ослабления или экранирования определим как отношение поля H_0 вне экрана к полю H_1 внутри экрана /область 1/: $\kappa = H_0/H_1$. Проследим кратко

обычный путь рассуждений, приводящий к выражению ϕ через геометрические размеры экрана и магнитную проницаемость μ ферромагнитного материала /см., например, /3/ /, так как некоторые промежуточные выводы нам будут полезны.

В любой области поле удовлетворяет уравнению Максвелла: $\text{div} \vec{B} = 0$. Вводя потенциал ϕ так, что $\vec{H} = \nabla \phi$, получим для него уравнение Лапласа: $\Delta \phi = 0$. Решение уравнения обычно пишется в виде $\phi(r, \theta, z) = R(r) \cdot \Phi(\theta)$, где r, θ, z - цилиндрические координаты. Подставляя это выражение в уравнение Лапласа и разделяя переменные, для угловой части получаем: $\Phi(\theta) = A \cos \theta$. Для радиальной части решение ищем в виде $R(r) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n r^n$.

После подстановки в уравнение для $R(r)$ получим условие: $\sum_{n=0}^{\infty} C_n (n^2 - 1) r^n = 0$. Отсюда следует, что от нуля отличны только коэффициенты C_n с индексами $n = \pm 1$. Таким образом, потенциал в I области имеет вид:

$$\phi_1 = (C_{1,i} r + \frac{C_{2,i}}{r}) \cos \theta; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad /1/$$

Для поля получим:

$$\vec{H}_1 = -(C_{1,i} - \frac{C_{2,i}}{r^2}) \cos \theta \cdot \vec{e}_r + (C_{1,i} + \frac{C_{2,i}}{r^2}) \sin \theta \cdot \vec{e}_\theta, \quad /2/$$

где \vec{e}_r и \vec{e}_θ - единичные векторы вдоль радиуса и перпендикулярно к нему. Из асимптотического поведения поля при $r \rightarrow \infty$ определяем коэффициент $C_{1,N} = H_0$.

В экранируемой области напряженность магнитного поля имеет повсюду конечные значения, включая и районы около осей ($r \rightarrow 0$), поэтому $C_{2,i} = 0$. Отсюда следует, что поле в области I однородное и его напряженность равна $H_1 = C_{1,i}$. Учитывая $\vec{B} = \mu \vec{H}$ и граничные условия $B_{1,r} = B_{i+1,r}$, $H_{1,\theta} = H_{i+1,\theta}$, получим систему уравнений для коэффициентов $C_{1,i}$ и $C_{2,i}$.

$$C_{1,1} = \mu_1 \left(C_{1,2} - \frac{C_{2,2}}{r_1^2} \right)$$

$$C_{1,1} = C_{1,2} + \frac{C_{2,2}}{r_1^2}$$

$$\mu_1 \left(C_{1,2} - \frac{C_{2,2}}{r_2^2} \right) = C_{1,3} - \frac{C_{2,3}}{r_2^2}$$

$$C_{1,2} + \frac{C_{2,2}}{r_2^2} = C_{1,3} + \frac{C_{2,3}}{r_2^2}$$

$$C_{1,3} - \frac{C_{2,3}}{r_3^2} = \mu_2 \left(C_{1,4} - \frac{C_{2,4}}{r_3^2} \right) \quad /3/$$

$$C_{1,3} + \frac{C_{2,3}}{r_3^2} = C_{1,4} + \frac{C_{2,4}}{r_3^2}$$

$$\mu_n \cdot \left(C_{1,N-1} - \frac{C_{2,N-1}}{r_{2n}^2} \right) = H_0 - \frac{C_{2,N}}{r_{2n}^2}$$

$$C_{1,N-1} + \frac{C_{2,N-1}}{r_{2n}^2} = H_0 + \frac{C_{2,N}}{r_{2n}^2}$$

Начиная с последних двух уравнений, последовательно исключая неизвестные коэффициенты, получим для κ при $\mu_1 \gg 1$ /:

$$\kappa_n \approx \frac{\mu_1}{4} \frac{\mu_2}{4} \dots \frac{\mu_n}{4} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right) \dots \left(1 - \frac{r_{2n-1}^2}{r_{2n}^2} \right) \cdot /4/$$

Точная формула для двухслойного экрана следующая:

$$\kappa_2 = \frac{(\mu_1 + 1)^2 (\mu_2 + 1)^2}{16 \mu_1 \mu_2} \left\{ \left[1 - \frac{(\mu_1 - 1)^2}{(\mu_1 + 1)^2} \frac{r_1^2}{r_2^2} \right] \left[1 - \frac{(\mu_2 - 1)^2}{(\mu_2 + 1)^2} \frac{r_3^2}{r_4^2} \right] - \frac{\mu_1 - 1}{\mu_1 + 1} \frac{\mu_2 - 1}{\mu_2 + 1} \frac{(r_2^2 - r_1^2)(r_4^2 - r_3^2)}{r_3^2 r_4^2} \right\} \quad /5/$$

Исследуя уравнение /4/ на экстремум, можно показать, что коэффициент ослабления максимален, когда

$$\frac{r_i}{r_{i+1}} = \text{const}, \text{ т.е. радиусы составляют геометрическую}$$

прогрессию с этой константой. Однако практически такую геометрию экрана нельзя осуществить, так как толщины слоев получаются большими и их нельзя будет размагнитить на промышленной частоте из-за скин-эффекта /толщина скин-слоя для стандартных марок пермаллоя равна 0,2 мм/. Разумно использовать для экрана широкий пермалловый прокат толщиной 1 мм. Считая, что все слои сделаны из одинакового материала, и вводя

$$\text{средний радиус } i\text{-слоя } R_i = \frac{r_{2i} + r_{2i-1}}{2} \text{ и толщину } t, \text{ пре-}$$

образуем уравнение /4/ к следующему виду:

$$\kappa_n = \left(\frac{\mu t}{4} \right)^n \prod_{i=1}^n \frac{(2R_i + t) [R_i^2 - (R_{i-1} + t)^2]}{R_i^2 (R_i + t)^2}, \quad /6/$$

где $R_0 = -t$.

Если задать внутренний и внешний радиусы, то можно найти набор значений R_i^2 , при котором κ_n максимально. Аналитически исследовать на максимум уравнение /6/ очень сложно, поэтому такая оптимизация была проделана численно на ЭВМ. Основной вывод этих расчетов заключается в том, что максимум κ_n достигается для распределения R_i по геометрической прогрессии. Однако выражен этот максимум довольно слабо. Это обстоятельство демонстрируется на рис. 2, где приведены

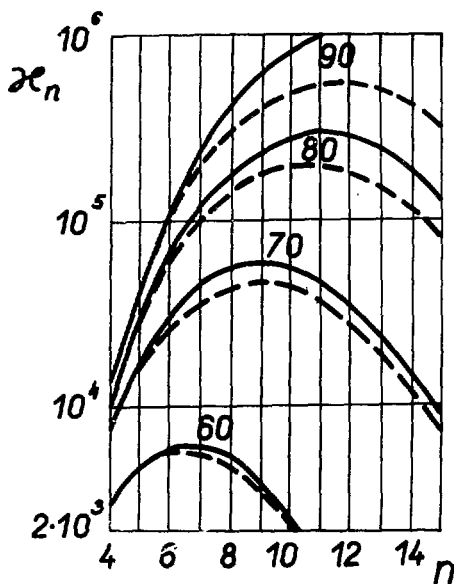


Рис. 2. Коэффициент ослабления κ_n в зависимости от числа слоев магнитного экрана n для распределения радиусов слоев по геометрической прогрессии /сплошные кривые/ и для равномерного распределения /пунктирные кривые/. Радиус первого слоя R_1 - 45 см, толщина слоев $t = 1$ мм, магнитная проницаемость $\mu = 30\,000$, соответствует пермаллою марки 80 НХС. Число около каждой пары кривых обозначает радиус внешнего слоя R_n /см/.

зависимости κ_n от числа слоев при различных значениях R_n для распределения радиусов по геометрической прогрессии /сплошные кривые/ и равномерного распределения с одинаковыми зазорами между слоями /пунктирные кривые/. Поэтому дальнейшие расчеты проводились для равномерного распределения. Цель этих расчетов заключалась в определении числа слоев и внешнего радиуса

экрана, соответствующих минимуму веса, R_n и n определены при заданных значениях ослабления и радиуса первого слоя. Результаты расчетов представлены на рис. 3 в виде зависимостей веса погонного метра экрана P от n и R_n при разных k_n . Так как значения n дискретны, то и значения R_n при заданном k_n также получают дискретными. Для рис. 3 в образцовых точках условно соединены сплошными кривыми.

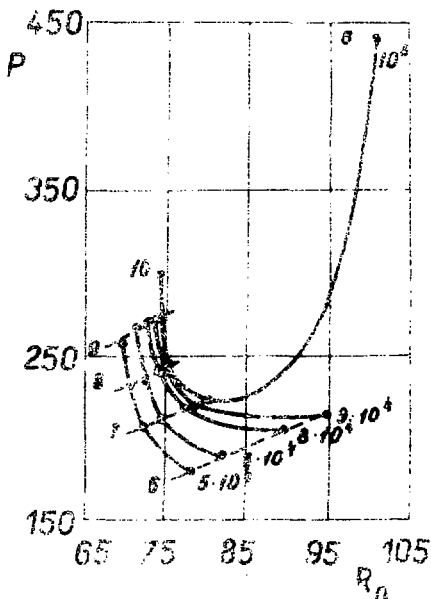


Рис. 3. Зависимость веса P (кг/м) погонного метра экрана из пермаллоя с $\mu = 30000$ при заданном ослаблении k_n от радиуса внешнего слоя R_n (см) и числа слоев. Число около сплошной кривой дает значение k_n , а число около пунктирной кривой дает значение n .

В установке "Тристом" требуется ослабление 15 000 /см. §1/. Учитывая, что расчеты проводились для идеализированного экрана бесконечной длины, введем коэффициент запаса 3, т.е. необходимое $\kappa \geq 5 \cdot 10^4$. В этом случае для экрана из пермаллоя с $\mu = 30\,000$ и $R_{\Gamma} = 45$ см оптимальное число слоев 6 и $R_6 = 75 - 80$ см, при этом $P = 170 - 180$ кг/м.

б/ Моделирование экрана

Для проверки выводов, сделанных в §2а, а также для изучения топографии магнитного поля внутри экрана была изготовлена модель цилиндрического магнитного экрана приблизительно в 1/4 необходимых габаритов.

Слой экрана были сварены встык из листового пермаллоя 80 НХС толщиной 0.25 мм и отожжены в вакууме при температуре 1150 С в стандартном режиме. Распределение диаметров и длин слоев следующее /в мм, первая цифра - диаметр, вторая - длина/: 1/ 202, 495; 2/ 214, 512; 3/ 226, 529; 4/ 240, 546; 5/ 254, 563; 6/ 269, 580. С торцов экран закрывался крышками, имевшими отверстия диаметром 40 мм, имитировавшими отверстия для ввода нейтронов УХН с одной стороны и высоковольтного ввода с другой стороны в реальной установке /1/. Ось экрана была ориентирована строго перпендикулярно вектору напряженности магнитного поля в лабораторном помещении.

в/ Размагничивание

Размагничивание проводилось стандартным образом с помощью пропускания переменного тока промышленной частоты по проводнику, проходящему вдоль оси экрана. Внутри экрана проводник был выполнен в виде полый трубы с внутренним диаметром 160 мм и длиной 350 мм с целью расположения в ней датчика магнитометра. При таком способе размагничиваются сразу все слои.

г/ Магнитометр

Нами использовался промышленный феррозондовый магнитометр СКГ-58 М с паспортной чувствительностью 16,7γ /мв. Датчик магнитометра, представляющий собой

цилиндр диаметром 19 мм и длиной 93 мм, крепился к механизму ориентации и перемещения, расположенному внутри экрана так, что ось датчика была перпендикулярна оси экрана. Чувствительный объем датчика равен $70 \times 2,4 \times 1,5$ мм. Датчик имеет калибровочную обмотку, для которой связь среднего по чувствительному объему значения магнитного поля и текущего по ней тока следующая: $H(\gamma) = /6.55 \pm 0.15/ I$ /мкА/. С помощью этой обмотки была снята зависимость выходного напряжения V магнитометра от тока I /рис. 4/ при расположении датчика внутри экрана с остаточным полем $\approx 300 \gamma$. При этом датчик был соригенирован так, чтобы выходной сигнал был равен нулю при $I = 0$.

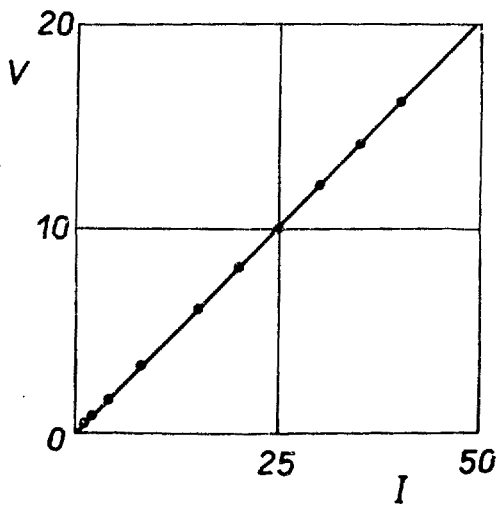


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения U /мВ/ магнитометра СКГ-58М от тока I /мкА/ в калибровочной обмотке датчика.

Наклон линии на рис. 4 равен 0.4 мВ/мкА . Используя связь H и I для калибровочной катушки, получим чув-

ствительность датчика $16,4 \mu$ мВ, что близко к паспортному значению.

а) Результаты магнитных измерений

Перед измерением остаточного магнитного поля H_1 внутри экрана с числом слоев n на него надевалось доп. устройство — две две слои n производилось тщательное размагничивание. Затем дополнительно n слоев свинца и производились измерения H_1 . На рис. 5 показаны

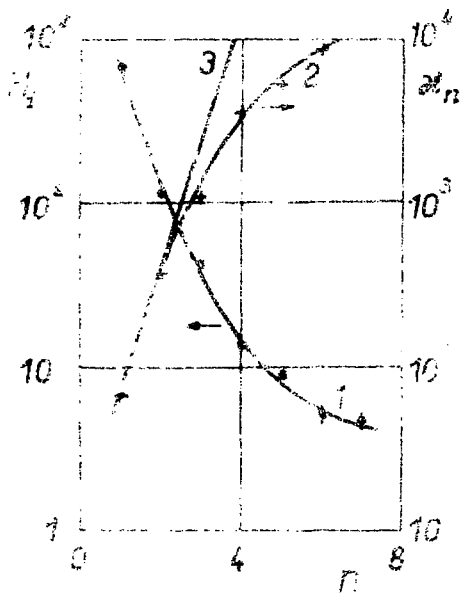


Рис. 5. Зависимость остаточного поля H_1 (кривая 1) и коэффициента ослабления μ (кривая 2) от количества слоев n модели магнитного экрана. Прямая 3 — теоретическая с магнитной проницаемостью $\mu = 52000$.

полученная таким образом зависимость H_1 от n для центра экрана (кривая 1). Используя значение невоз-

мушенного геомагнитного поля на месте экрана 45 000), можно вычислить ослабление экрана κ_n /кривая 2/. Согласно ур. /6/, ослабление в полуделогарифмическом масштабе должно линейно нарастать с увеличением n /кривая 3/. Фактически линейная зависимость оправдывается только для первых двух слоев. При $n > 2$ заметный вклад в H_1 начинает вносить рассеянное поле, обусловленное остаточной намагниченностью слоев. Кропотливая работа, проведенная нами для получения оптимального режима размагничивания, не дала больших результатов: ниже 5γ с экраном из 6 слоев пермаллоя спуститься не удалось.

Из величины ослабления для экрана с $n = 1$ и 2 была определена по ур. /5/ магнитная проницаемость μ пермаллоя: $a/n = 1$, $\mu = 54\ 000$; $b/n = 2$, $\mu \approx 50\ 000$. Прямая 3 на рис. 5 построена со средним значением $\bar{\mu} = 52\ 000$. Топография магнитного поля снималась по двум координатам: вдоль оси и по радиусу. На оси экрана в интервале ± 10 см от его центра остаточное поле однородно в пределах 2γ . Так же однородно поле в плоскости поперечного сечения экрана /рис. 6/. В объеме прямоугольного параллелепипеда со сторонами $20 \times 7 \times 7$ см среднеквадратичное отклонение от среднего значения поля оказалось равным $(\Delta H_0)^2 = 0,5\gamma$, что значительно лучше необходимого /см. §1/.

е/ Термическое размагничивание

В попытке получить меньшее остаточное поле первый /самый внутренний/ слой из пермаллоя был заменен слоем из особого сплава с довольно низкой точкой Кюри / ≈ 150 С/, поэтому можно было произвести его размагничивание термическим образом внутри собранного экрана. Цилиндр 1-го слоя сваривался из проката толщиной 0,5 мм и отжигался в вакууме при температуре 1150 С в стандартном режиме. При сборке экрана на первый слой из указанного сплава был установлен нагреватель из нихромовой проволоки, а вместо второго слоя была установлена теплозащита, так что измерения проводились для пятислойного экрана. Из коэффициента

ослабления κ_1 магнитная проницаемость материала была найдена равной 18 000.

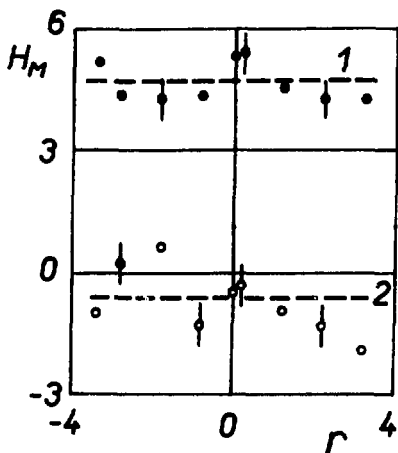


Рис. 6. Зависимость показаний магнитометра $H_M(y)$ внутри модели шестислойного пермаллового экрана от радиуса r /см/: 1 - ось датчика параллельна вектору напряженности остаточного магнитного поля в центре экрана; 2 - ось датчика перпендикулярна этому вектору.

С помощью термического размагничивания более низкое остаточное поле получить не удалось. Наоборот, после него остаточное поле даже увеличивалось до 8 - 10 у. Правда, затем с помощью токового размагничивания можно было получить 3 - 3,5 у /рис. 7/. Оценочные измерения в диапазоне температур 15 - 30°С показали, что для получения более низкого и стабильного значения остаточного поля слой из специального сплава нужно поддерживать при температуре 10 - 14 С.

ж/ Осевая компонента остаточного поля

До сих пор речь шла о перпендикулярной оси магнитного экрана компоненте остаточного магнитного поля. Нами были проведены также измерения при ори-

ентации феррозондового датчика вдоль оси экрана. Почти во всем объеме экрана величина осевой компоненты не превышала $1,5 - 2\gamma$. Таким образом, основной вклад в остаточное поле вносила поперечная компонента.

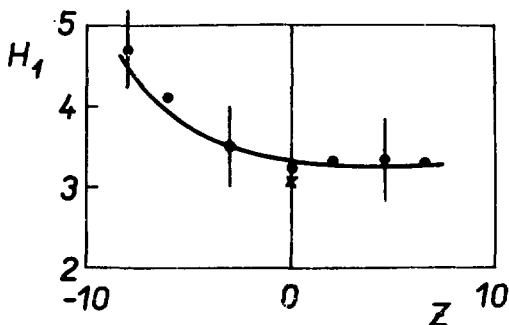


Рис. 7. Зависимость модуля вектора напряженности остаточного магнитного поля $H_1(\gamma)$ на оси модели пятислойного экрана от осевой координаты z . Результаты, представленные в виде кружков, получены сразу после последовательного термического и токового размагничивания. Крестиком обозначен результат, полученный через неделю.

3. СИСТЕМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для выбора конкретной системы, создающей постоянное магнитное поле **внутри** магнитного экрана установки "Тристом", воспользуемся результатами работы ^{4/}. В ней рассматривается три варианта магнитной системы: а/ соленоид с двумя параксиальными катушками; б/ соленоид с двумя экваториальными корректирующими катушками; в/ две пары экваториальных и параксиальных катушек. Вариант "а" при одинаковых размерах систем дает заданную однородность поля в большем объеме, поэтому нами был выбран этот вариант. В ^{4/} для этой системы приведены следующие оптимальные соотношения между размерами /рис. 8/ :

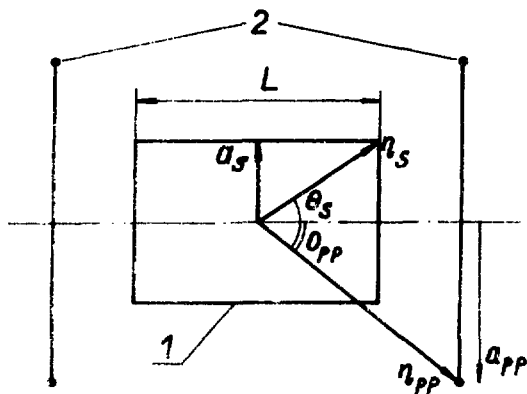


Рис. 8. Магнитная система из тонкого соленоида 1 и двух параксимальных катушек 2.

$$a_s/r_s = 0,75593; \quad \cos \theta_s = 0,65465; \quad r_{pp}/r_s = 1,28864;$$

$$a_{pp}/r_s = 0,82984; \quad \cos \theta_{pp} = 0,765055.$$

В нашем случае средняя относительная однородность магнитного поля по объему накопительной камеры

установки $\sigma = \frac{\sqrt{(\Delta H_0)^2}}{H_0}$ должна быть не хуже $1 - 2 \cdot 10^{-3}$

/см. §1/. Согласно^{4/}, такое отклонение поля от его значения в центре обеспечивается не далее $0,54 r_s$ по оси и $0,72 r_s$ по радиусу. Из этих условий и значения диаметра D_k накопительной камеры может быть найдена нижняя граница на величину $r_s \geq 0,925 D_k$ и, соответственно, $a_s \geq 0,7 D_k$, для которых заведомо выполняется наше требование на однородность.

Для определения: 1/ соотношения между токами через соленоид I_s и корректирующие катушки I_k ; 2/ необходимой точности в выполнении этого соотношения и 3/ допусков на точность изготовления системы были проведены численные расчеты σ на ЭВМ с использованием точных формул для осевых компонент вектора

напряженности магнитного поля от тороидального соленоида и кольцевого тока ^{/5/};

$$H_z^s(r, z) = \frac{2nI_s}{10L} \sum_{i=1}^2 [F(k_i) + \Pi(c^2, k_i)] \frac{a_s - r}{a_s + r} \frac{z_i}{\sqrt{(a_s + r)^2 + z_i^2}},$$

где $z_1 = z$; $z_2 = L - z$; $k_i^2 = \frac{4a_s r}{(a_s + r)^2 + r_i^2}$; $c^2 = \frac{4a_s r}{(a_s + r)^2}$;

n - число витков.

$$H_z^{pp}(r, z) = \frac{2I_k}{10} [F(k) + \frac{a_{pp}^2 - r^2 - z^2}{(a_{pp} - r)^2 + z^2} E(k)] \frac{1}{\sqrt{(a_{pp} + r)^2 + z^2}},$$

где $k = \frac{4a_{pp} r}{(a_{pp} + r)^2 + z^2}$; E, F, Π - полные эллиптические интегралы 1-го, 2-го и 3-го родов. Поле от системы соленоид + два тока равно:

$$H_z(r, z) = \frac{2I_s n}{10L} (P^s + TP^{pp}),$$

где P^s и P^{pp} - геометрические факторы соленоида и кольцевого тока, соответственно /см. уравн. /7/ и /8//,

$T = \frac{I_k}{I_s} \cdot \frac{L}{n}$ - параметр, варьируя который можно изменять степень однородности поля.

Так как поле является гладкой функцией координат, то для сокращения времени счета на ЭВМ поле в нужной точке находилось с помощью линейной интерполяции по двумерной сетке, предварительно рассчитанной по точной формуле с определенным шагом. Интерполяционные коэффициенты находились методом наименьших квадратов по ближайшим четырем точкам сетки. На рис. 9 приведена типичная зависимость средней /по объему камеры с размерами $h_k = 0,6775 a_s$ и $D_k = 1,355 a_s$ / относительной однородности σ магнитного поля, создаваемого идеальной системой, от параметра T . Минимальное значение σ достигается при $T = 50,6$ и равно $\approx 5 \cdot 10^{-5}$. Чтобы выполнить наше требование на σ параметр T должен быть выдержан с точностью не хуже $\approx 2\%$, что легко достигается.

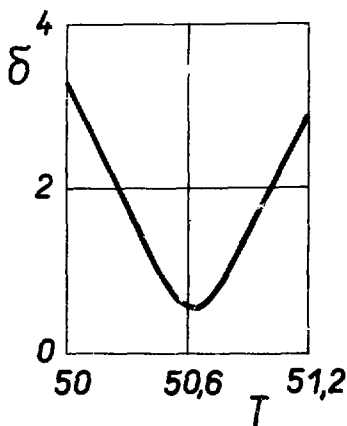


Рис. 9. Зависимость средней относительной однородности σ /в ед. 10^{-4} / магнитного поля, создаваемого соленоидом и двумя корректирующими токами с оптимальным соотношением между размерами, от параметра T . Усреднение проведено по цилиндрическому объему длиной $0,6775 a_s$ и диаметром $1,355 a_s$, где a_s - радиус соленоида.

Расчеты σ с варьированием линейных размеров системы, а также введение эллипсности /отступление от точного круга/ соленоида и корректирующих витков, показали, что при механическом изготовлении системы ее оптимальные размеры должны быть выдержаны с точностью не хуже 0.5%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из требования $a_s \geq 0,7 D_1$ /см. §3/ и создания необходимого электрического зазора между камерой и соленоидом^{2/}, было определено значение радиуса соленоида установки "Тристом" $a_s = 36,5$ см. Оптимальное значение радиуса корректирующего витка

равно $a_{pp} = 40$ см. Отсюда радиус первого слоя магнитного экрана был выбран равным $R_1 = a_{pp} + 1$ см = 41 см.

В качестве материала для экрана будет использован широкий прокат из пермаллоя марки 79 НМ толщиной 1 мм. Так как магнитная проницаемость 79 НМ приблизительно в два раза хуже, чем у 80 НХС, то зазор между слоями полномасштабного экрана выбран в два раза большим, чем следовало из результатов моделирования /см. §2,6/.

В спроектированном экране заложено следующее распределение диаметров и длин слоев /в мм/: 1/ 820, 1950; 2/ 934, 2040; 3/ 1046, 2080; 4/ 1158, 2120; 5/ 1270, 2160; 6/ 1382, 2180. Общий вес требуемого количества пермаллоя 450 кг.

Автор благодарен А.А.Шиканяну за проведение некоторых численных расчетов. Б.И.Воронову и В.И.Константинову за участие в проектировании модели магнитного экрана.

Литература

1. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ РЗ-7147, РЗ-7149, Дубна, 1973.
2. Ю.В.Таран. Депонированное сообщение ОИЯИ Б1-3-7151, Дубна, 1973.
3. Д.А.Стреттон. Теория магнетизма. ОГИЗ, М.-Л., 1948.
4. M.W.Garret. J. of Appl.Phys., 22, 1091, 1951.
5. K.F.Muller. Arch. of Electrotech., 17, 347, 1926.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1973 года.