

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



9275

ЭКЗ ЧИТ. ЗАЛА

P13 - 9275

Ю.В.Таран

ПЯТИСЛОЙНЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ЭКРАН  
ОБЪЕМОМ  $1,5 \text{ м}^3$

II. Магнитные измерения  
феррозондовым магнитометром

1975

P13 - 9275

Ю.В.Таран

ПЯТИСЛОЙНЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ЭКРАН  
ОБЪЕМОМ 1,5 м<sup>3</sup>

II. Магнитные измерения  
феррозондовым магнитометром

## Summary

The topography of the residual magnetic field in a five-layer permalloy cylindrical screen (the internal volume being about  $1.5\text{m}^3$ ) has been measured with the aid of the fluxgate magnetometer (the response being about  $2 \cdot 10^{-6}\text{Oe}$ ). The results of these measurements are presented. In the volume of  $45 \times 45 \times 15\text{cm}^3$  (along the screen axis) the meansquare homogeneity of the transverse and longitudinal components of the residual field was obtained to be  $3.4 \cdot 10^{-5}\text{Oe}$  and  $2.8 \cdot 10^{-5}\text{Oe}$ , respectively, which satisfies the requirements to the screen as a magnetic shielding for the installation "Tristom" used for the neutron electric dipole moment measurements by ultracold neutrons.

## Введение

В работе<sup>/1/</sup> далее обозначается как часть 1/ была описана конструкция пятислойного цилиндрического пермаллового экрана с внутренним объемом около  $1,5\text{ м}^3$ , сооруженного в ЛНФ ОИЯИ для защиты установки "Тристом" от геомагнитного поля и помех низкой частоты. В этой установке, предназначенной для измерения электрического дипольного момента /ЭДМ/ нейтрона с помощью ультрахолодных нейтронов /УХН/, предъявляются достаточно высокие требования к однородности магнитного поля.

Используя результаты работ<sup>/2,3/</sup>, сформулируем требования на однородность магнитного поля в установке и, тем самым, на однородность остаточного магнитного поля в экране, исходя из следующих соображений: 1/ деполаризация УХН во время их выдержки в накопительной камере должна быть достаточно мала, чтобы сильно не ухудшилась чувствительность установки, характеризующая ошибкой в измерении ЭДМ нейтрона  $\Delta D$ , которая обратно пропорциональна поляризации УХН  $f_n$ ; 2/ эффективное уширение резонансной линии должно быть достаточно мало, чтобы чувствительность установки также сильно не ухудшилась.

1. Согласно расчетам Лущикова /1969 г./, Ефимова и Игнатовича /1974 г./<sup>/3/</sup>, изменение поляризации УХН во времени  $t$  описывается следующим выражением:

$$f_n \approx 1 - \frac{1}{2} \delta_{\perp}^2 \frac{m}{\rho}, \quad /1/$$

где  $v$  - скорость УХН,  $l$  - корреляционная длина\*,

$$\delta_{\perp}^2 = \delta_x^2 + \delta_y^2, \delta_{x(y)}^2 = \sigma_{x(y)}^2 / (\bar{H})^2, \sigma_{x(y)}^2 = \overline{H_{x(y)}^2 - (H_{x(y)})^2},$$

$\bar{H}_{x(y)}$  - величина поперечной  $x(y)$  -компоненты магнитного поля в установке\*\*. Черта над символом означает усреднение по объему накопительной камеры. Используя типичные значения  $v = 5 \cdot 10^2$  см с<sup>-1</sup>,  $t = 50$  с и  $l = 10$  см, получим требование на относительную неоднородность поперечных компонент магнитного поля  $\delta_{\perp} \leq 3 \cdot 10^{-2} \sqrt{\Delta f_n}$ , что, скажем, для  $\Delta f_n = 0,1$  и величины магнитного поля  $\bar{H} = 1500 \gamma$ , предусмотренной в установке "Тристом", дает условие на абсолютную среднеквадратичную неоднородность  $\sigma_{\perp} \leq 15 \gamma$ .

2. Согласно работам<sup>/2, 3/</sup>, ошибка в определении ЭДМ нейтрона равна:

$$\Delta D \approx \Delta D_0 \left(1 + \frac{1}{2} \Phi^2\right), \quad /2/$$

где  $\Delta D_0$  - ошибка с однородным полем,  $(\Phi^2)^{1/2}$  - среднеквадратичный угол дополнительной прецессии УХН, обусловленный неоднородностью магнитного поля\*\*\*;

\*Под корреляционной длиной понимается средний размер областей неоднородностей поля. В установке "Тристом" она может быть отождествлена со средней длиной свободного пробега УХН между столкновениями со стенками камеры, так как магнитное поле, создаваемое соленоидом, является гладкой функцией координат.

\*\* Соленоид, предназначенный для создания рабочего поля в установке "Тристом", расположен соосно внутри магнитного экрана, так что продольная компонента  $H_z \gg H_x, H_y$ .

\*\*\* Для  $\Phi^2$  взято выражение из работы<sup>/2/</sup>. В работе<sup>/3/</sup> численный множитель в  $\Phi^2$  найден равным  $2^{-1/2}$ , т.е. требования на однородность поля менее жесткие. Однако в работе<sup>/2/</sup> с помощью численного моделирования эксперимента было показано, что уравнение<sup>/3/</sup> справедливо с точностью не хуже 15%.

$$\overline{\Phi^2} = 2\gamma_n^2 \sigma_z^2 \frac{lt}{v}, \quad /3/$$

где, в свою очередь,  $\gamma_n$  - гиромангнитное отношение нейтрона,  $\sigma_z^2$  - дисперсия  $z$ -компоненты.

Обозначая ухудшение чувствительности эксперимента  $\Delta D / \Delta D_0$  через  $m$ , получим для использованных ранее значений  $v, t$  и  $l$  - требование на абсолютную среднеквадратичную неоднородность продольной /основной/ компоненты магнитного поля  $\sigma_z \leq 5,5 \sqrt{m - 1}$ , что для вполне допустимого ухудшения чувствительности эксперимента на 30% ( $m = 1,3$ ) дает  $\sigma_z \leq 3 \gamma$ .

В настоящей работе описывается процедура магнитных измерений остаточного поля внутри экрана с помощью феррозондового магнитометра и полученные результаты.

#### Аппаратура

Для измерений использовался промышленный трех-компонентный феррозондовый магнитометр СКГ-58 М. Феррозонд был установлен на платформе механизма перемещения и ориентации /рис. 1/, расположенной в плоскости, перпендикулярной оси экрана, и имевшей четыре степени свободы:

1/ вдоль оси  $z$ , параллельной оси экрана, 2/ по радиусу  $R$  в плоскости, перпендикулярной оси экрана, 3/ по азимутальному углу  $\phi$ , и 4/ по углу вращения  $\alpha$  вокруг оси, перпендикулярной платформе и проходящей через ее центр. Центру экрана соответствовали координаты  $z=R=0$ . Перемещение феррозонда по первым трем степеням позволяло устанавливать его в любую точку объема пространства, равного объему накопительной камеры установки "Тристом"\*.

\*Камера представляет собой цилиндр диаметром 0,5 м и длиной 10-15 см, ось которого совпадает с осью экрана.

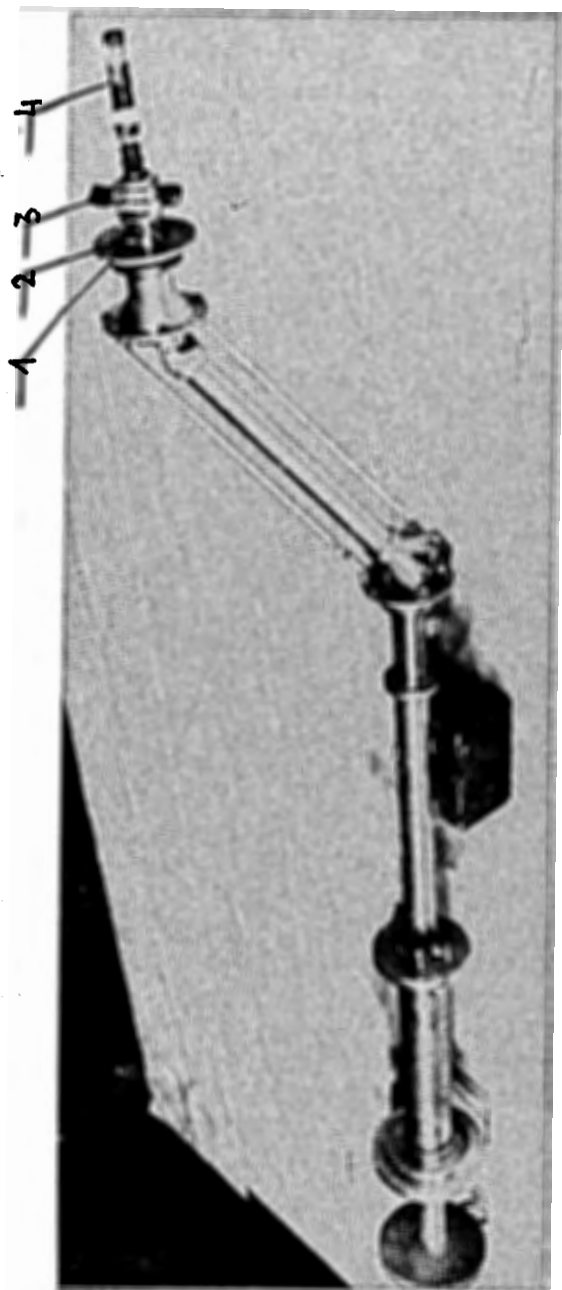


Рис. 1. Механизм ориентации и перемещения трехкомпонентного феррозондового магнитометра: 1 - платформа, 2 - ФЗХ, 3 - ФЗУ, 4 - ФЗЗ.

В выбранной для измерения точке датчики феррозонда, используемые для измерения компонент  $H_x$  и  $H_y$  /со-кращенно: ФЗХ и ФЗУ/, могли быть повернуты на угол  $\alpha$  в пределах от 0 до  $360^\circ$ , что позволяло систематически контролировать "нуль" магнитометра\*. При этом датчик для измерения компоненты  $H_z$  /ФЗЗ/ своей ориентации в пространстве не изменял.

Выход электронного блока феррозонда был подключен к потенциометру постоянного тока типа ППТВ с зеркальным гальванометром; цена деления последнего составляла 0,015 мВ. Для контроля чувствительности аппаратуры каждый датчик имел калибровочную обмотку с постоянной 6,39  $\gamma$  /мкА. В пределах от 0 до 100 мкА выходная характеристика магнитометра внутри экрана была найдена линейной с производной: 1/ для ФЗХ и ФЗУ - 0,403 мВ/мкА, и 2/ для ФЗЗ - 0,413 мВ/мкА, что дает для их чувствительностей 15,8  $\gamma$  /мВ и 15,6  $\gamma$  /мВ, соответственно\*\*. При этом цена деления гальванометра соответствовала  $\approx 0,25\gamma$ . Стабильность "нуля" датчиков в течение дня измерений лежала в этих пределах.

#### Результаты измерений

В программу магнитных измерений с феррозондовым магнитометром были включены следующие задачи: 1/ изучение влияния расположения блока крышек экрана относительно его цилиндрической части на остаточное поле в центре; 2/ исследование долговременной стабильности остаточного поля; 3/ восстановление топографии остаточного поля в объеме накопительной камеры; 4/ изучение

\* Феррозондовый магнитометр в отсутствие магнитного поля имеет на выходе конечный сигнал /"нуль" прибора/, стабильность и величина которого определяются точностью изготовления датчика и балансировки электронной схемы. При повороте датчика на  $180^\circ$  относительно перпендикулярной оси, проходящей через его середину, составляющая сигнала, обусловленная магнитным полем, меняет знак, что позволяет определить "нуль" прибора.

\*\* Паспортная чувствительность 16,7  $\gamma$  /мВ.

влияния ориентации экрана на величину  $z$ -компоненты поля на оси экрана.

1. В исследованиях на модели экрана в  $1/4$  натуральной величины /4/ было отмечено, что в центре его можно было получить несколько меньшее остаточное поле /3 -  $3,5\gamma$  вместо  $5 - 5,5\gamma$  /, если первый /самый внутренний/ слой не имел крышек. Для исследования этого эффекта, а также для определения оптимального положения /"нахлеста"/ крышек относительно обечаек были проведены измерения зависимости остаточного поля в центре экрана от величины  $\Delta z$ , связанной с величиной нахлеста /рис. 2/.

Было найдено, что к положению крышек более чувствительна поперечная компонента  $H_{\perp}$  остаточного поля, чем продольная. Хотя в отдельных случаях результаты получались хорошими /см., например, рис. 3/, никакой повторяемости в ходе зависимости  $H_{\perp}(\Delta z)$  не наблюдалось. Статистически было установлено, что при  $\Delta z < 4$  см воспроизводство достаточно низкого значения  $H_{\perp}$  было наихудшим, поэтому для дальнейших измерений было сделано  $\Delta z = 4$  см. При отсутствии нахлеста результаты не выходили за рамки обычных.

2. В части 1 сообщались предварительные результаты измерения стабильности остаточного поля в центре экрана в течение месяца. Наличие механизма перемещения и ориентации позволило контролировать долговременную стабильность поля по выделенному объему внутри экрана. Так как измерение полной топографии в таком объеме представляет очень трудоемкую работу, то оно осуществлялось лишь эпизодически, а периодическому контролю подвергалась только зависимость  $H_{\perp}(z)$  при  $R=0$ , которая снималась достаточно быстро. Было установлено, что в течение примерно одного месяца после размагничивания идет деформация топографии остаточного поля с увеличением его среднего значения и ухудшением однородности. Затем наступает относительная стабилизация остаточного поля. Динамика процесса старения иллюстрируется кривыми  $H_{\perp}(z)$  на рис. 4, снятыми в течение двух месяцев.

3. По истечении двух месяцев после размагничивания было проведено полное восстановление топографии оста-

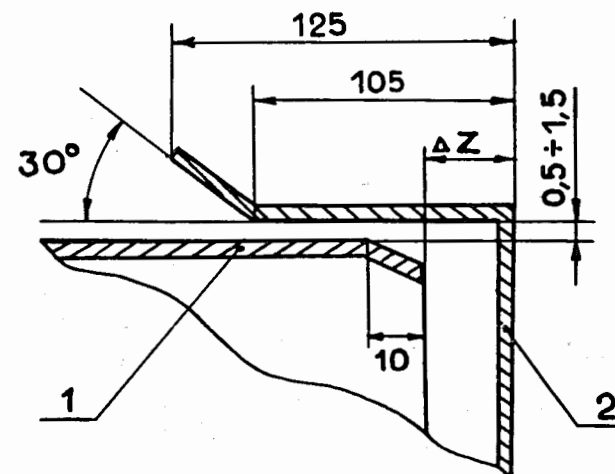


Рис. 2. Стыковка крышки и обечайки магнитного экрана: 1 - обечайка, 2 - крышка, Размеры в мм.

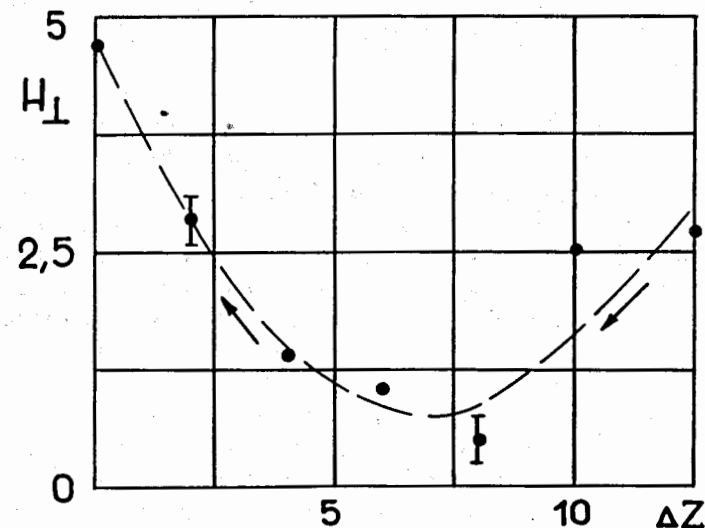


Рис. 3. Зависимость поперечной компоненты  $H_{\perp}(\gamma)$  остаточного поля в центре магнитного экрана от величины  $\Delta z$  /см/.

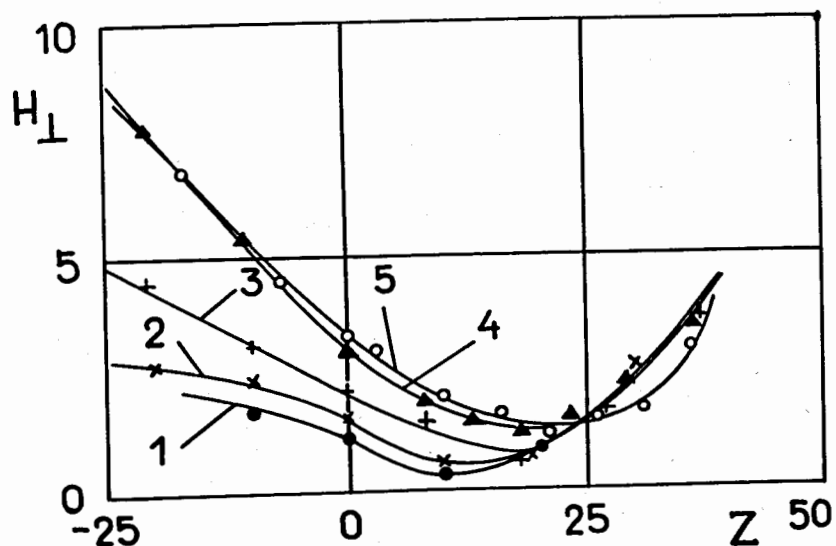


Рис. 4. Зависимость  $H_{\perp}$  ( $\gamma$ ) от  $z$  /см/ на оси экрана / $R = 0$ /: 1 - через 1 час после размагничивания, 2 - через 3 суток, 3 - через 1 неделю, 4 - через 1,5 месяца, 5 - через 2 месяца. Центру экрана соответствует  $z = 0$ .

точного поля в объеме с размерами  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = 45 \times 45 \times 15 \text{ см}^3$ , равного объему накопительной камеры установки "Тристом". На рис. 5 с иллюстративной целью показана топография поперечной компоненты  $H_{\perp}$  в плоскости  $z = 0$ . В верхней половине плоскости поле сильно деформировано локальной неоднородностью в намагниченности первого слоя экрана\*. В нижней половине  $H_{\perp}$  значительно более однородно. Качественно характер топографии поля в поперечных сечениях экрана при  $z$  в пределах от -10 до 10 см сохраняется.

Для нахождения нужных нам дисперсий поперечной и продольной компонент остаточного поля  $\sigma_{\perp}^2$  и  $\sigma_z^2$  были получены достаточно большие массивы значений  $H_{\perp}$  и  $H_z$ . Так как дисперсия поперечной компоненты равна

\* Многократные попытки с помощью циркулярного размагничивания или минимизировать эту неоднородность оказались безуспешными.

$\sigma_{\perp}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ , то из измеренных значений модуля вектора  $H_{\perp}$  и его направления /угол  $\alpha$ / находились компоненты  $H_x = H_{\perp} \cos(\alpha + \phi)$  и  $H_y = H_{\perp} \sin(\alpha + \phi)$ , из массива значений которых и определялись  $H_{x(y)}$  и  $H_{x(y)}^2$ . В измерениях продольной компоненты  $H_z$  из-за отсутствия возможности периодически поворачивать ФЗЗ на  $180^\circ$ , находился полный сигнал  $H'_z = H_z + H_z^0$ , где  $H_z^0$  - "нуль" магнитометра, что не мешало определению дисперсии  $z$ -компоненты, так как  $\sigma^2(H'_z) = \sigma^2(H_z) \equiv \sigma_z^2$ .

Результаты измерений по указанному объему оказались следующими  $H_x = 2,3 \gamma$ ,  $\sigma_x = 2,6 \gamma$ ;  $H_y = 1,2 \gamma$ ,  $\sigma_y = 2,3 \gamma$ ;  $\sigma_{\perp} = 3,4 \gamma$  и  $\sigma_z = 2,8 \gamma$ , что дает неоднородность остаточного поля  $\sigma = \sqrt{\sum \sigma_i^2} = 4,4 \gamma$ . Любопытно, что, хотя ход среднего значения поперечной компоненты  $H_{\perp}$ , найденной в плоскости  $z = \text{const}$ , в зависимости от  $z$  в пределах от -10 до 10 см качественно повторяет ход  $H_{\perp}(z)$  при  $R=0$  на рис. 4, величина  $\sigma_{\perp}$  от  $z$  практически не зависит. Аналогично,  $\sigma_z$  для тех же плоскостей флюктуирует не более, чем на 25%.

4. Для определения коэффициента экранирования  $k_{\parallel}$  горизонтальной компоненты  $H_{\text{гор}}$  геомагнитного поля  $H_{\text{гео}}$  крышками экрана и отсюда точности установки экрана относительно вектора  $H_{\text{гео}}$  была измерена зависимость показаний ФЗЗ от угла  $\beta$  между осью экрана и линией, перпендикулярной  $H_{\text{гео}}$  и лежащей в горизонтальной плоскости.\* Было найдено, что эта зависимость

носит линейный характер и наклон ее равен  $\frac{\Delta H_z}{\Delta \beta} = 1,64 \gamma / \text{град} / \text{рис. 6}$ . Пользуясь значениями  $H_{\text{гео}} = 45000 \gamma$  и угла склонения вектора  $H_{\text{гео}}$ ,  $\theta = 60^\circ$ , получим для  $k_{\parallel} = (H_{\text{гео}} \cdot \cos \theta \cdot \sin \beta) / \beta (\Delta H / \Delta \beta) = 240$ . На модели<sup>4/</sup> было получено  $k_{\parallel} = 450$ , но, во-первых, у нее было 5 крышек на каждом торце вместо 4 на данном экра-

\* Эта линия была найдена в предварительных измерениях в отсутствие экрана.



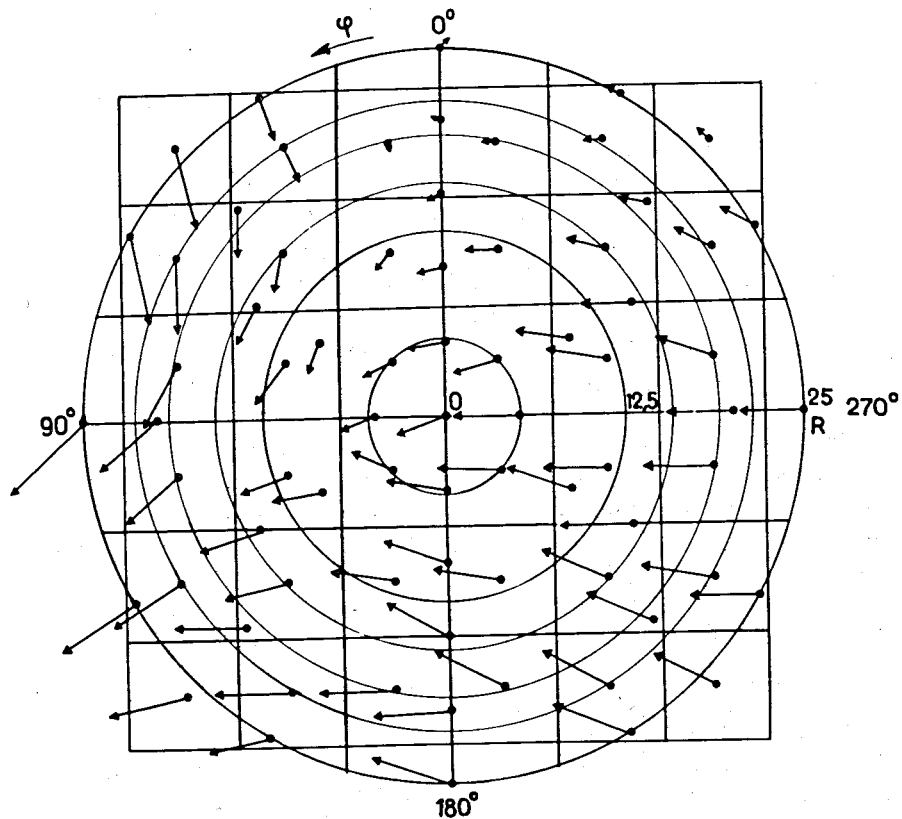


Рис. 5. Топография поперечной компоненты  $H_{\perp}$  остаточного поля в магнитном экране в плоскости  $z=0$ . Азимутальный угол  $\phi$  отсчитывается от вертикали против часовой стрелки. Радиус  $R$  в см. Длина стрелки в 1 см соответствует величине  $H_{\perp}$  в 2γ.

не /см. часть 1/, во-вторых, она была изготовлена из пермаллоя марки 80 НХС, имевшего  $\mu_0 = 52000^*$ , а для

\* Значение  $\mu_0$  было экспериментально определено в процессе последовательной сборки модели из размагниченных обечаек. Такой возможности при сборке описываемого экрана не имелось.

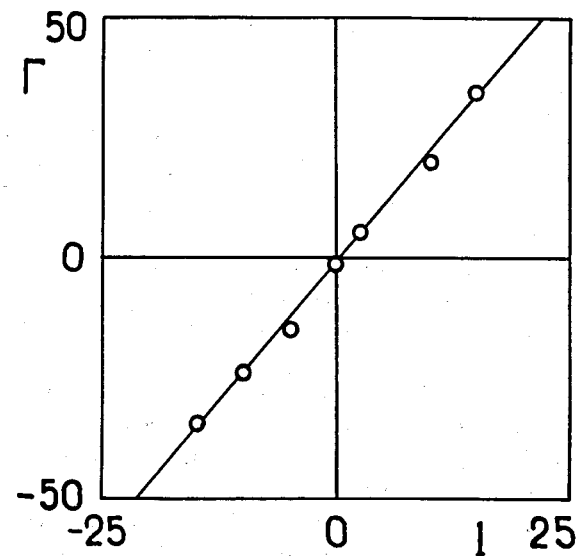


Рис. 6. Показания гальванометра  $\Gamma$  (дел.) в зависимости от длины дуги  $l$  /см/ радиуса  $r = 174,2$  см с началом точки отсчета от линии, перпендикулярной  $H_{\text{гео}}$ ; 1 см по  $l$  соответствует  $0,33^\circ$  по  $\beta$ .

данного экрана, не ожидается  $\mu_0$  больше 48000; в-третьих, в торцах данного экрана имеются дополнительные отверстия для ввода различных коммуникаций в установку "Тристом"; в-четвертых, зазор между крышками модели был равен 8,5 мм, в то время как по принципу магнитного подобия с данным экраном модель должна была бы иметь его равным 6,25 мм. Двухкратное отличие в  $\kappa_{\parallel}$  с учетом того, что в экране зазор между обечаиками по сравнению с его моделью увеличен в 2 раза, дает косвенное указание на то, что для данного экрана коэффициент экранирования  $\kappa_{\perp}$  поперек его оси равен не менее  $10^5$ , что совпадает с оценкой в части 1. Прямое измерение  $\kappa_{\perp}$  будет описано в части III.

Из величины  $\kappa_{\parallel}$  и условия  $H_z < l\gamma$  получим требование на точность установки экрана относительно вектора  $H_{\text{гео}}$ :  $\beta \leq 0,6^\circ$ .



## Заключение

Сравнивая полученные результаты по однородности остаточного поля в экране с требованиями для установки "Тристом", отметим, что: 1/ однородность поперечных компонент значительно лучше требуемой; 2/ однородность продольной компоненты находится в пределах, допускаемых 25-процентным ухудшением чувствительности установки, что может быть компенсировано 50-процентным увеличением статистической обеспеченности эксперимента.

Долговременная стабильность остаточного поля достаточна для устойчивой работы быстрой схемы стабилизации с динамическим диапазоном не более  $\gamma$  без периодического размагничивания экрана.

Автор пользуется случаем поблагодарить Ю.В.Никитенко, В.Б.Дучица и А.И.Сальникову 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, Р3-7149, Дубна, 1973.
3. В.Н.Ефимов, В.К.Игнатович. Сообщение ОИЯИ, Р4-8253, Дубна, 1974.
4. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ, Р3-7377, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 ноября 1975 года.