

27/II-84



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

117/84

P13-83-797

Ю.В.Таран

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ  
МАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ

Направлено в журнал  
"Приборы и техника эксперимента"

1983

1. Широкое применение в различных областях науки и техники нашли многослойные ферромагнитные экраны. Для высокоэффективного экранирования больших объемов от геомагнитного поля/г.м.п./ и магнитных помех наиболее подходящими являются цилиндрические экраны. В данной статье описаны результаты разработок и испытаний горизонтальных цилиндрических экранов, которые, в частности, нужны для экспериментов на пучках частиц, имеющих, как правило, горизонтальное расположение. В такие экраны наиболее удобно вводить пучки частиц, измерительную аппаратуру и исследуемые объекты.

2. Цилиндрический экран, помещенный с произвольной ориентацией в статическое магнитное поле, по-разному ослабляет поперечную /относительно оси экрана/ и продольную компоненты этого поля. Количественной мерой этого ослабления является нормальный коэффициент экранирования /н.к.э./  $k = H_e / H_1$ , где  $H_e$  и  $H_1$  - поперечные или продольные компоненты внешнего однородного и проникшего внутрь экрана полей соответственно /если внутри экрана имеется рассеянное поле, вызванное его остаточной намагниченностью, то оно должно быть надлежащим образом учтено/. Эффективность экрана по отношению к медленным /квазистатическим/ вариациям поля характеризуется дифференциальными /д./ к.э. возрастания  $k_{d+}$  и убывания  $k_{d-}$ , определяемыми как пределы отношений  $\Delta H_e / \Delta H_1$  и  $-\Delta H_e / (-\Delta H_1)$  соответственно при  $\Delta H_e \rightarrow 0$ . При изменении внешнего поля в пределах  $\Delta H_e = H_{e2} - H_{e1}$  поле внутри экрана варьируется по частному циклу /ч.ц./ перемагничивания, на котором можно определить средний к.э.  $\bar{k} = (H_{e2} - H_{e1}) / (H_{e2} + H_{e1})$ . При  $\Delta H_e \rightarrow 0$   $\bar{k}$  переходит в  $k_{d-}$ . В нулевом поле ( $H_e \rightarrow 0$ ) понятие н.к.э. теряет смысл; при малых же значениях  $H_e$ , когда магнитная проницаемость  $\mu$  материала экрана соответствует ее начальному значению  $\mu_0$  и не зависит от  $H_e$ , н.к.э. и д.к.э. совпадают.

Теоретические расчеты поперечного ( $k_{\perp}$ ) и продольного ( $k_{\parallel}$ ) к.э. существенно различны по своим подходам. Расчет  $k_{\perp}$  легко осуществляется в приближении бесконечно длинного экрана и постоянства  $\mu$  /см., например, /1/. Наиболее компактная формула, связывающая  $k_{\perp}$  с параметрами экрана, была получена в /2/:

$$k_{\perp} = \frac{\mu_1}{4} \frac{\mu_2}{4} \dots \frac{\mu_n}{4} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right) \dots \left(1 - \frac{r_{2n-1}^2}{r_{2n}^2}\right), \quad /1/$$

где  $n$  - число слоев,  $r_{2i-1}$  и  $r_{2i}$  - внутренний и внешний радиусы

$i$ -слоя соответственно /приближение  $\mu \gg 1$  /. Считая, что все слои сделаны из одного достаточно тонкого материала и вводя средний радиус  $i$ -слоя  $R_i = (r_{2i-1} + r_{2i})/2$ , преобразуем /1/ к следующему виду:

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

где  $t$  - толщина слоя,  $R_0 = -t$ . Исследования /2/ при заданных габаритах экранируемого объекта и экрана показали, что /1/ зависимость  $k_{\perp}(n)$  носит экстремальный характер; 2/ при  $n = \text{const}$  максимум  $k_{\perp}$  достигается для распределения  $R_i$  по геометрической прогрессии. Однако по сравнению с равномерным распределением этот максимум выражен довольно слабо, поэтому для практических целей можно рекомендовать равномерное распределение. Для этого случая в /2/ проведены расчеты по оптимизации экранов и минимизации их веса при различных предположениях о габаритах объекта и необходимой степени экранирования. Отметим, что /1/ и /2/ практически применимы уже при  $L/D > 2+3$ , где  $L$  и  $D$  - длина и диаметр экрана.

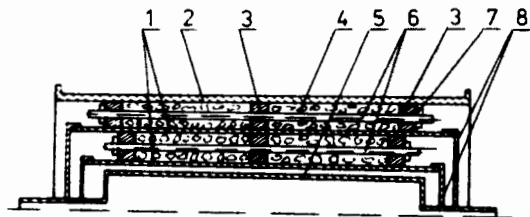
Существенно хуже дело обстоит с расчетом  $k_{\parallel}$ . Задача решена, и то приближенно, только для однослойного экрана /3/. Было показано, что  $k_{\parallel}$  сильно зависит от  $L/D$ , падая с его увеличением. Например, при  $L/D = 2+3$   $k_{\perp}/k_{\parallel} = 4+5$ .

Предположение о постоянстве  $\mu$  нереалистично при экранировании г.м.п. Действительно, коэрцитивная сила пермаллоев составляет доли или единицы мкТ, а г.м.п. равно  $\approx 40$  мкТ. В этих условиях внешние слои экрана сильно насыщены и при вариации  $H_e$  будут наблюдаться гистерезисные эффекты, исследование которых позволяет определять д.к.э.

3. Конструктивно экраны выполнены в виде многослойной сборки из пермалловых цилиндров, установленных соосно в цилиндрическом несущем корпусе /рис.1/. Цилиндры сваривались в стык дугой в атмосфере аргона. При отжиге, транспортировке и монтаже они находились в вертикальном положении. После монтажа сборка переводилась в горизонтальное положение. Для того, чтобы избежать при этом ухудшения магнитных свойств пермаллоя из-за возникающих механических напряжений\*, была разработана такая конструкция крепления цилиндров, которая позволила равномерно распределить сжимающие напряжения по их сечению и существенно подавить напряжения изгиба /4/. Помимо корпуса она состоит из наполнителя, ко-

\* Например, поперечное сжимающее напряжение  $0,1 \text{ кг мм}^{-2}$  снижает  $\mu_0$  пермаллоя 79 НМ на 70%. Другие виды напряжений действуют еще сильнее. Расчет по схеме кольца с опорой в одной точке показал, что в свободном цилиндре напряжения изгиба могут достигать нескольких  $\text{кг мм}^{-2}$ .

Рис.1. Конструкция многослойного цилиндрического экрана: 1 - пермаллоевые цилиндры, 2 - несущий корпус из алюминиево-магниевого сплава, 3 - пенопластовые кольца, армированные дюралюминием, 4 - наполнитель - вспененный гранулированный полистирол, 5 - токопровод из алюминиево-магниевого сплава, 6 и 7 - шпильки и гайки из немагниевых материалов, 8 - торцовые пермаллоевые крышки.



лец и шпилек. При монтаже наполнитель засыпался между цилиндрами /включая корпус/ и спрессовывался с помощью колец и шпилек. Для более равномерного сжатия наполнителя по длине экрана зазор между цилиндрами делился на секции /рис.1/. Оценка возможных средних напряжений поперечного сжатия, выполненная по аналогии с расчетом подшипников скольжения, дала величину  $\approx 10^{-4}$  кг·мм<sup>-2</sup>, которой можно пренебречь. Более подробно конструкция и технология создания экрана описаны в<sup>5/</sup>.

Цилиндры в экране снабжены торцовыми крышками из того же материала. Они имеют короткую цилиндрическую часть, позволяющую пацель их на соответствующие цилиндры. Крышки каждого торца экрана собраны в блок, имеющий независимую подвеску на корпус. В центре крышек сделаны отверстия для ввода токопровода систем размагничивания и подмагничивания экрана.

Токопровод выполнен в виде полый секционированной трубы/рис.1/, что позволяет: 1/ одновременно размагничивать или подмагничивать /6/ все цилиндры практически при одинаковой напряженности переменного магнитного поля; 2/ вводить и выводить пучки частиц, измерительную аппаратуру и исследуемые объекты; 3/ использовать токопровод как каркас катушечных систем различной конфигурации или кожух /в том числе вакуумный/ экранируемой установки. При подмагничивании экрана в трубе конечной длины будет создаваться цилиндрическое переменное магнитное поле, которое, хотя существенно слабее поля вне трубы, может быть нежелательно в ряде случаев. Для снижения уровня этого поля ток подмагничивания должен быть пропущен в обратном направлении через корпус экрана<sup>7/</sup>. Это практически не изменит подмагничивающее поле, но сильно подавит поле внутри токопровода.

В табл.1 приведены параметры и некоторые характеристики двух экранов, 5-слойного<sup>5/</sup> и 8-слойного<sup>8/</sup>, с внутренними объемами 1,4 и 0,02 м<sup>3</sup> соответственно, результаты испытаний которых даны ниже.

Таблица 1

Параметры магнитных экранов

Параметр 1)	Номер цилиндра, считая снаружи							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр цилиндра, см	138,4	127,2	116,0	104,8	93,6 <sup>2)</sup>			
	32,3	30,3	28,5	26,9	25,4	24,0	22,6	21,4 <sup>3)</sup>
Длина цилиндра, см	218	216	212	208	204			
	62,9	61,2	59,5	57,8	56,1	54,4	52,7	51,0
$\mu_0 \cdot 10^{-4}$ (эксп.)	1,7 (среднее по 5 слоям)							
	1,77	3,78	3,76	4,53	5,35			
Пермаллой	79 НМ, лист 1600 x 600 x 1 мм <sup>3</sup>							
	80 НХС, лента 250 x 0,25 мм <sup>2</sup>							
Отжиг	Водород; нагрев 56°C·час <sup>-1</sup> , начиная с 400°C, выдержка 13 час. при 1140 - 1150°C, охлаждение 27°C·час <sup>-1</sup> до 600°C, далее с выключенной печью							
	Вакуум; при 1150°C по стандартной технологии							

1) Первая строка для каждого параметра относится к 5-слойному экрану, а вторая - к 8-слойному.

2) Равномерное распределение диаметров.

3) Распределение по геометрической прогрессии.

4. Изучение характеристик экранов производилось с помощью трехкомпонентного феррозондового /ф.з./ и оптического квантового /о.к./ магнитометров /м/ с порогом 0,2 нТ и чувствительностью 1 пТ·Гц<sup>-1/2</sup> соответственно. ф.з.м. с помощью специального устройства мог сканироваться в цилиндрическом объеме  $\phi$  0,6 м и длиной до 1 м.

Для вариации поперечной компоненты внешнего поля на экране использовались изогнутые /по цилиндрической поверхности/ прямоугольные катушки /и.п.к./<sup>9/</sup> и двухпроводная линия /д.п.л./<sup>10/</sup>, а для вариации продольной компоненты - соленоид и кольцевая катушка /к.к./. Измерения с д.п.л. основаны на том факте, что поперечные к.э. от однородного и цилиндрического полей\* совпадают

\* Цилиндрическое поле создается линейным проводником с током, расположенным вне экрана параллельно его оси. Использование двух параллельных проводников с противоположно направленными токами, т.е. д.п.л., решает проблему подводящих проводов.

для центра экрана<sup>/11/</sup>. Так как к.к. создает существенно неоднородное поле, то для ее калибровки, а также независимых измерений  $k_{\parallel}$  экран вращался в горизонтальной плоскости, что позволяло варьировать  $H_{e\parallel}$  в пределах горизонтальной компоненты г.м.п.

Для функционирования о.к.м. внутри 5-слойного экрана с помощью кольцевой системы<sup>/2,12/</sup> создавалось магнитное поле 1-10 мкТ с однородностью в объеме  $0,04 \text{ м}^3$  не хуже  $2+3 \text{ нТ}$ . Относительная стабильность источника питания<sup>/13/</sup> системы была не хуже  $10^{-5}$ .

5. Около 10 лет используется 5-слойный экран /рис.2/, поэтому его характеристики изучены достаточно подробно<sup>/5,14,15/</sup>. Кратко изложим наиболее существенные результаты. В центре только что собранного экрана остаточное поле составило  $H_{i\perp} \approx 60 \text{ нТ}$  и  $H_{i\parallel} \approx 5 \text{ нТ}$ . Первое размагничивание было осуществлено пропуском тока 1 кА промышленной частоты. В дальнейшем требовался ток не более 50 А. Остаточное поле величиной  $H_{i\perp} \approx 5 \text{ нТ}$  и  $H_{i\parallel} \approx 2 \text{ нТ}$  воспроизводится устойчиво с точностью  $\pm 1 \text{ нТ}$ . Восстановление распределения остаточного поля в объеме  $\bar{V} 50 \text{ см}$  и длиной 15 см после двухмесячной выдержки в постоянных условиях дало среднее значение компонент  $H_{i\perp} \approx 3 \text{ нТ}$  и  $H_{i\parallel} \approx 2 \text{ нТ}$  со среднеквадратичным разбросом 4 и 3 нТ соответственно, т.е. остаточное поле сильно неоднородно.

Для измерения  $k_{\perp}$  после размагничивания экрана в нулевом поле производилось его намагничивание /кривая 1 на рис.3/ с заходами в ч.ц. при заданных значениях  $H_{e\perp}$ . Экран при этом был сориенти-

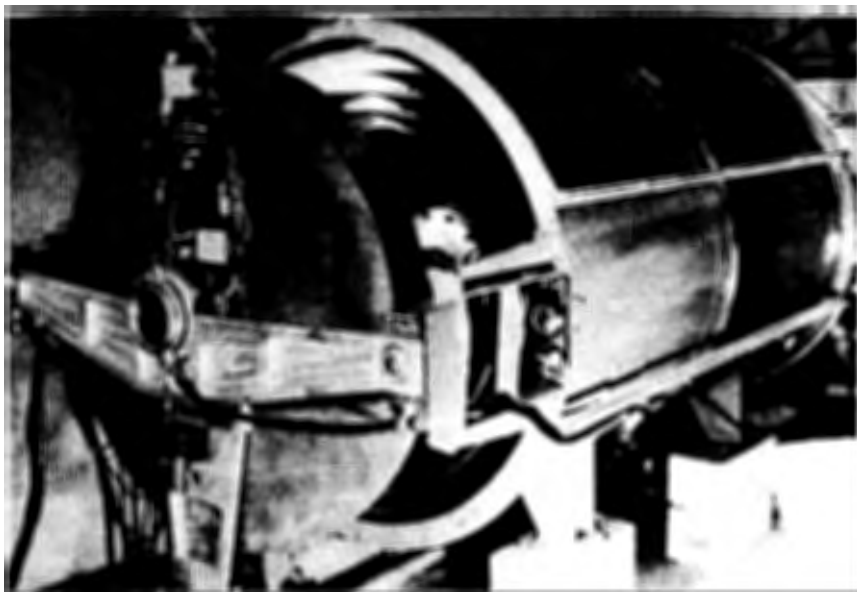


Рис.2. 5-слойный цилиндрический магнитный экран /блок крышек сдвинут/.

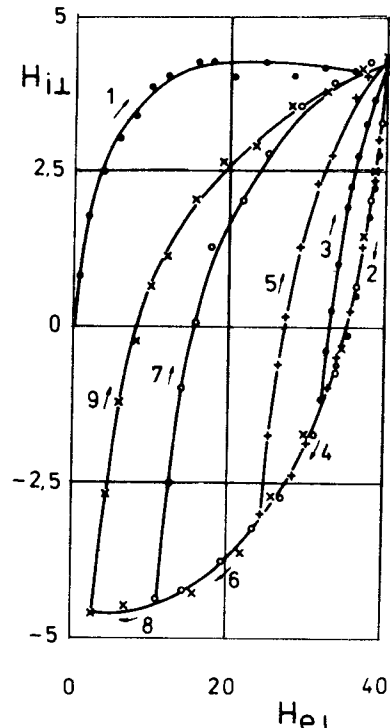
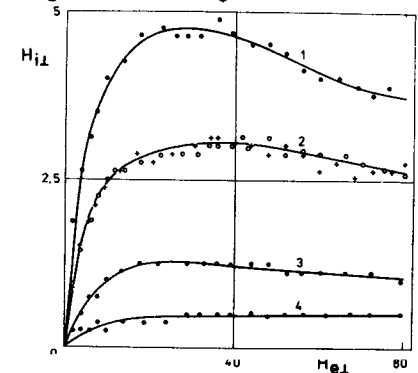


Рис.3. Основная кривая намагничивания /1/ и петли ч.ц. /2-9/ 5-слойного экрана,  $H_{i\perp}$  - нТ,  $H_{e\perp}$  - мкТ.

Рис.4. Основные кривые намагничивания 5-слойного экрана при разных токах подмагничивания: 1 - 0; 2 -  $10^{-2} \text{ А}$  /приведены экспериментальные точки для двух последовательных циклов "размагничивание - намагничивание"; видна достаточно хорошая воспроизводимость результатов/; 3 -  $10^{-1} \text{ А}$ ; 4 - 1 А.  $H_{i\perp}$  - нТ,  $H_{e\perp}$  - мкТ.



рован в горизонтальной плоскости так, чтобы отсутствовала продольная компонента от г.м.п. Варьируя амплитуду  $\Delta H_{e\perp}$  ч.ц., находили зависимость  $k_{\perp}(\Delta H_{e\perp})$  /см. рис.4 в<sup>/15/</sup>, экстраполяция которой к нулю давала значение  $k_{\perp d\pm}$ . Для нахождения  $k_{\perp d\pm}$  осуществлялось дифференцирование основной кривой намагничивания экрана. Для нулевого поля было найдено  $k_{\perp d\pm} = 740^*$ , а для г.м.п.  $k_{\perp} = 8,3 \cdot 10^3$  и  $k_{\perp d-} = 660$ . Последнее значение качественно правильно отражает слабую зависимость  $\mu_{d-}$  от  $H_e$  /см., например, /16//. Из рис.3, а также рис.4 /кривая 1/ видно, что  $H_{i\perp}$  проходит через максимум при увеличении  $H_{e\perp}$ . Это дает разрыв в зависимости  $k_{\perp d+}$  от  $H_{e\perp}$ . Качественное объяснение этого эффекта дано в<sup>/15/</sup>.

Измерения  $k_{\parallel}$  при намагничивании экрана поперечным полем дали 270 и 240 для нулевого поля и г.м.п. соответственно, отношение которых хорошо согласуется с отношением соответствующих значений  $k_{\perp d-}$ .

\*Расчет  $\mu_0$  по уравнению /2/ в предположении одинаковости всех слоев дал значение  $1,7 \cdot 10^4$  - против  $4,9 \cdot 10^4$ , указанного в заводском сертификате на пермаллой. Причины расхождения остались неясны.

Аналогичные измерения к.э. были выполнены при подмагничивании экрана переменным током промышленной частоты /рис.4/. При токе 1А было наблюдеено 20- и 10-кратное усиление  $k_{\perp}$  для нулевого поля и г.м.п. Усиление  $k_{\parallel}$  было слабее /при 3А в 7 раз/.

Результаты исследования стабильности остаточного поля и спектра частот описаны в /17/.

6. С 8-слойным экраном ввиду его относительно небольших размеров магнитные измерения проводились также в процессе сборки. Кратко изложим их результаты. Детальная информация дана в /8/.

Таблица 2

Коэффициенты экранирования при послойной сборке 8-слойного экрана<sup>1)</sup>

параметр \ n <sup>2)</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8
		$H_{i\perp}$ , нТ <sup>3)</sup>	1230	310	71	16,5	2+3	1+2	2+3
$K_{\perp}$	нулевое поле	13,7	51,5	195	895	5660			
	г.м.п.	32	133	640	4090	25340			
$K_{\parallel}$ (нулевое поле)	соленоид	7,33	15,8	25,6	40,8	55	72	81	115
	вращение	7,35							87

1) Сборка осуществлялась начиная с внешнего слоя.

2) n - число слоев в сборке.

3) Поперечная компонента поля внутри экрана, находящегося в г.м.п. и сориентированного своей осью перпендикулярно его вектору. Разброс в значениях  $H_{i\perp}$  характеризует повторяемость результатов при многократном повторении процедуры "намагничивание - размагничивание".

Измерения  $k_{\perp}$  для нулевого поля при послойной сборке /табл.2/ дали возможность определить  $\mu_0$  для первых пяти цилиндров, считая снаружи /табл.1/. Она изменяется от  $1,7 \cdot 10^4$  до  $5,3 \cdot 10^4$  /последнее значение близко к сертификатному/. Если для остальных слоев принять обратную последовательность значений  $\mu_0$ , то может быть получена нижняя оценка для поперечного к.э. полной сборки:  $4 \cdot 10^5$  и  $10^6$  в нулевом поле и г.м.п. соответственно /без использования подмагничивания/. Измерение  $k_{\parallel}$  экрана без

крышек дало значение  $10^2$ . Установка крышек привела к 18-кратному увеличению  $k_{\parallel}$ .

Исследование топографии и стабильности остаточного поля внутри экрана показали, что в интервале +10 см от центра среднее значение и неоднородность поля равны  $1,5$  и  $1$  нТ, а стабильность в полосе частот  $2 \cdot 10^{-4}$  -  $2 \cdot 10^{-1}$  Гц не хуже  $0,2$  нТ.

7. Полученные значения  $k_{\perp}$  достаточно высоки. Этого нельзя сказать о  $k_{\parallel}$ . Его относительно малое значение не допускает произвольной установки экрана в г.м.п. Это не всегда желательно или вообще невозможно, например при проведении экспериментов на пучках частиц, трассировка которых заранее определена. Для повышения  $k_{\parallel}$  вместо тривиального увеличения слоев в /18/ предложено использование многослойных крышек /18/, что представляется более экономичным. На 8-слойном экране было проведено моделирование работы двухслойной крышки из того же материала с воздушным зазором 8,5 мм. Хотя наблюдавшееся увеличение  $k_{\parallel}$  было невелико /в среднем 40% в расчете на один цилиндр/, оно может дать заметный эффект в многослойных сборках. Например, оснащение 8-слойного экрана такими крышками даст рост  $k_{\parallel}$  в 20 раз.

8. Описанные здесь экраны длительное время находятся в эксплуатации. На базе 5-слойного экрана создан квантовооптический стабилизатор магнитного поля /13, 17, 19/ магниторезонансного спектрометра /2, 9, 20/ на ультрахолодных нейтронах. 8-слойный экран используется для биологических исследований, в частности, были проведены опыты с дрожжами /21/ и лизогенной культурой E.coli K12( $\lambda$ ) /22/.

Описанные разработки были выполнены по инициативе члена-корреспондента АН СССР Ф.Л.Шапиро, памяти которого автор посвящает статью. Автор благодарит Н.А.Алексеева, Б.И.Воронова, Д.С.Давидкова, В.И.Константинова, С.И.Лукьянова, Ю.В.Никитенко, А.И.Селезнева, В.А.Шиканяна и А.И.Чепурного, принимавших участие в работе на разных ее этапах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каден Г. Электромагнитные экраны. Госэнергоиздат, М.-Л., 1957.
2. Таран Ю.В. ОИЯИ, Р3-7337, Дубна, 1973.
3. Mager A. J.of Appl.Phys., 1968, vol.39, p.1914.
4. Алексеев Н.А. и др. Авторское свидетельство №687391. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979, № 35, с.182.
5. Алексеев Н.А. и др. ОИЯИ, Р13-9221, Дубна, 1975.

6. Таран Ю.В. Авторское свидетельство №571833. Бюлл. ОИПОТЗ, 1977, № 33, с.155.
7. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. Авторское свидетельство №951410. Бюлл. ОИПОТЗ, 1982, № 3, с.217.
8. Давидков Д.С. и др. ОИЯИ, P13-81-586, Дубна, 1981.
9. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. ОИЯИ, P3-7379, Дубна, 1973.
10. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. Авторское свидетельство №611322. Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, № 22, с.188.
11. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. ОИЯИ, P13-10067, Дубна, 1967.
12. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. ОИЯИ, P13-81-307, Дубна, 1981.
13. Козлов А.Н. и др. ПТЭ, 1981, № 1, с.210.
14. Таран Ю.В. ОИЯИ, P13-9275, Дубна, 1975.
15. Никитенко Ю.В., Таран Ю.В. ОИЯИ, P13-10068, Дубна, 1976.
16. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. "Энергия", М., 1973, с.19.
17. Kozlov A.N., Nikitenko Yu.V., Taran Yu.V. Nucl. Instr. and Meth., 1982, vol.192, p.379.
18. Таран Ю.В. ОИЯИ, P13-82-790, Дубна, 1982.
19. Никитенко Ю.В., Роганов А.Б., Таран Ю.В. ОИЯИ, P13-12847, Дубна, 1979.
20. Таран Ю.В. ОИЯИ, P3-7149, Дубна, 1973.
21. Давидков Д.С. и др. ОИЯИ, P19-83-221, Дубна, 1983.
22. Аносова М.Г. и др. ОИЯИ, P19-83-392, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 ноября 1983 года.

Таран Ю.В. P13-83-797  
Многослойные цилиндрические магнитные экраны

Разработана конструкция многослойного цилиндрического магнитного экрана с торцовыми крышками в горизонтальном исполнении, позволившая существенно снизить механические напряжения в цилиндрах. Изготовлены два пермаллоевых экрана - 5-слойный и 8-слойный с внутренними объемами 1,4 и 0,02 м<sup>3</sup> соответственно - для проведения ядерно-физических и магнитобиологических исследований. Изучены характеристики этих экранов: поперечные и продольные коэффициенты экранирования, распределение и стабильность остаточного магнитного поля. Предложен простой метод подмагничивания экранов, позволивший существенно увеличить коэффициенты экранирования. Предложен и испытан метод повышения продольного коэффициента экранирования с помощью двухслойных торцовых крышек.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Taran Yu.V. P13-83-797  
The Multilayer Cylindrical Magnetic Shields

The multilayer cylindrical magnetic shield with horizontal orientation in which mechanical tensions were lowered substantially has been designed. The shield is equipped with face caps. Two permalloy 5- and 8-layer shields with inside volume of 1.4 and 0.02 m<sup>3</sup> for nuclear physical and biological investigations have been manufactured. Their characteristics are studied: transverse and longitudinal shielding factors, distribution and stability of the residual magnetic field. A simple method to magnetize the shield which allows one to increase substantially the shielding factor is proposed. A method for increasing the longitudinal shielding factor with two-layer face caps is proposed and tested.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой