

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗУСЛ1  
Д-361

14/III-75

P9 - 8486

1003/2-75

Ю.С.Дерендяев, И.Н.Иванов, А.К.Каминский,  
А.М.Каминская, В.М.Лачинов, В.К.Маковеев,  
В.П.Рашевский, Н.Б.Рубин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ  
ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ПРОВОДЯЩИМИ ЭКРАНАМИ

**1974**

**ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ**

P9 - 8486

Ю.С.Дерендяев, И.Н.Иванов, А.К.Каминский,  
А.М.Каминская, В.М.Лачинов, В.К.Маковеев,  
В.П.Рашевский, Н.Б.Рубин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ  
ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ПРОВОДЯЩИМИ ЭКРАНАМИ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

P9 - 8486

Дерендяев Ю.С., Иванов И.Н., Каминский А.К., Каминская А.М.,  
Лачинов В.М., Маковеев В.К., Рашевский В.П., Рубин Н.Б.

Исследование экранирования переменного магнитного поля  
проводящими экранами

Рассмотрен процесс экранирования переменного магнитного поля  
диском с отверстием, обечайкой и их комбинациями. Получены экспери-  
ментальные результаты. Описан метод расчета эксперимента на ЭВМ.  
Указанный метод позволяет рассчитать магнитное поле с учетом  
экранов различной формы в пределах аксиальной симметрии.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1974

Derendyaev Yu.S., Ivanov I.N., Kaminsky P9 - 8486  
Kaminsky A.K., Kaminskaya A.M., Lachinov V.M.,  
Makoveev V.K., Rashevsky V.P., Rubin N.B.

Investigation of the Variable Magnetic  
Field Screening by Conducting Screens

The problem is discussed of the screening of a va-  
riable magnetic field by a disc with holes, cylindrical  
surface of the chamber and their combinations. The experi-  
mental results are obtained. The technique of computation  
is given. The mentioned technique allows one to calculate  
the magnetic field taking into account the screens of dif-  
ferent forms in the axial symmetry limits.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1974

## I. Постановка задачи

Важной проблемой в создании коллективного уско-  
рителя является согласование полей на стыке адгеза-  
тора и ускоряющей системы. Для адгезатора /1/ с то-  
ковыми витками, расположенными внутри вакуумного  
объема, эта проблема включает в себя решение сле-  
дующих вопросов: 1) экранирование поля ускоряющей  
системы в области сжатия электронного кольца;  
2) борьба с искажениями поля камерой в области  
вывода кольца.

В данной работе рассматривается задача экра-  
нирования толстыми стенками внешнего поля в случае,  
когда величина скин-слоя сравнима с толщиной экрана.  
Программа расчета согласована с экспериментальными  
измерениями для экранов различной конфигурации и по-  
зволяет находить искажения поля внутри адгезатора.  
Она может быть применена при расчете экранирования  
экранами любой конфигурации в пределах аксиальной  
симметрии.

## II. Методика расчета вихревых токов и полей с учетом экранирования

Рассматриваются квазистационарные электромаг-  
нитные поля. Во внешнее переменное во времени маг-  
нитное поле поместили проводящий экран. Будем рас-  
сматривать случай, когда источник внешнего магнитного

поля и экран представляют собой тела вращения, коаксиально расположенные в пространстве. Под действием переменного внешнего магнитного поля в экране возникают вихревые токи. Электромагнитное поле при наличии экрана определяется следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}_0}{\partial t} - \frac{\partial \vec{B}_1}{\partial t} \\ \vec{J}_1 &= \sigma \vec{E} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{внутри} \\ \text{экрана,} \end{array} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_1 &= \vec{J}_1 \\ \operatorname{div} \vec{B}_1 &= 0 \\ \vec{B}_1 &= \mu \vec{H}_1 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{вне экрана.} \end{array} \quad (2)$$

Здесь  $\vec{B}_1$ ,  $\vec{H}_1$  - соответственно индукция и напряженность магнитного поля, обусловленные вихревыми токами в экране,  $\vec{J}_1$  - плотность вихревых токов,  $\vec{E}$  - электрическое поле в экране,  $\sigma$  - удельная проводимость экрана,  $\vec{B}_0$  - индукция внешнего поля,  $\mu$  - магнитная проницаемость.

Магнитное поле в пространстве представляется в виде суммы

$$(\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1) \quad (3)$$

внешнего поля  $\vec{B}_0$  и поля экрана  $\vec{B}_1$ . Для нахождения полей, вызванных вихревыми токами, нужно знать распределение плотности токов по экрану.

Разобьем экран на  $N$  элементарных колец с индуктивностью  $L_n$  и активным сопротивлением  $R_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ). Для  $n$ -го кольца справедливо уравнение

$$\operatorname{rot} \vec{E}_n = -\frac{\partial \vec{B}_0}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \sum_{m=1}^N \vec{B}_m \quad (4)$$

Проинтегрируем (4) по площади сечения кольца и воспользуемся теоремой Стокса

$$\int \operatorname{rot} \vec{E} \, ds = \oint \vec{E} \, d\ell$$

и определениями /2/

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \, d\ell,$$

$\mathcal{E}$  - электродвижущая сила, наводимая в контуре кольца;

$$\Phi = \int \vec{B} \, ds,$$

$\Phi$  - поток вектора  $\vec{B}$  через поверхность  $s$ ;

$$\Phi_{nm} = L_{nm} I_m,$$

$L_{nm}$  - взаимная индуктивность  $n$ -го и  $m$ -го витков. Получим

$$\mathcal{E}_n = -\frac{\partial \Phi_{n0}}{\partial t} - \sum_{m=1}^N L_{nm} \frac{\partial I_m}{\partial t} \quad (5)$$

Здесь  $\Phi_{n0}$  - поток индукции внешнего поля  $\vec{B}_0$  через контур  $n$ -го витка,

$$\Phi_n = \sum_{m=1}^N \Phi_{nm}$$

- поток индукции вихревых токов в экране через контур  $n$ -го витка.

Второй закон Кирхгофа, записанный с учетом уравнения (5), позволяет получить систему  $N$  дифференциальных уравнений для определения вихревых токов в экране:

$$L_n \frac{\partial I_n}{\partial t} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N L_{nm} \frac{\partial I_m}{\partial t} + I_n R_n = -\frac{\partial \Phi_{n0}}{\partial t} \quad (6)$$

Выражения для  $L_n$ ,  $L_{nm}$ ,  $R_n$  смотри, например, в /2/. Для решения системы уравнений (6) имеются  $N$  начальных условий: значения токов в начальный момент времени.

Систему уравнений (6) решаем численно методом Рунге-Кутты на ЭВМ БЭСМ-6. На рис. 1 показано распределение токов в экране (диск с отвер-

### III. Экспериментальная проверка расчетов

Результаты расчета проверялись экспериментально на установке, в которой в качестве источника внешнего магнитного поля использовался соленоид ускоряющей системы<sup>/5/</sup> модели коллективного ускорителя. На заданном расстоянии от соленоида соосно с ним устанавливались экраны в виде диска с отверстием, обечайки и их комбинаций и проводились измерения  $B_z$ -компоненты магнитного поля как в свободном пространстве (без экранов), так и при наличии экранов.

Соленоид состоял из 15 одиночных катушек среднего радиуса 0,205 м, расстояние между центрами катушек - 0,12 м. Переменное магнитное поле создавалось при разряде конденсаторной батареи на катушки соленоида. Форма импульса тока - полусинусоида. Время нарастания поля до максимума -  $1,2 \cdot 10^{-2}$  сек. Измерения магнитного поля проводились в следующей области  $r, z$ :

$$0,05 \leq r \leq 0,4 \text{ (м)}; \quad 0,1 \leq z \leq 1,0 \text{ (м)}$$

с шагом по  $r$   $\Delta r = 0,05$  м и с шагом по  $z$   $\Delta z = 0,02$  м ( $z = 0$  отсчитывалось от края соленоида;  $r = 0$  выбиралось в центре катушки).

Магнитное поле измерялось с помощью холловского магнитометра МИХ-2<sup>/6/</sup>, который позволял измерять значения магнитной индукции в заданный момент времени от 0 до 2,5 Т.

Магнитные измерения проводились датчиком Холла с размерами  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м,  $5 \cdot 10^{-4}$  м,  $1,3 \cdot 10^{-5}$  м. Для повышения точности измерений датчик Холла запитывался стабилизированным импульсным током. Чувствительность датчика при номинальном токе - 100 мВ/Т. Время измерения задавалось цифровой задержкой в пределах  $0-2 \cdot 10^{-2}$  сек относительно импульса запуска соленоида.

Погрешность измерений складывалась из неточности стабилизации напряжения на конденсаторной батарее, погрешности установки и определения координаты дат-

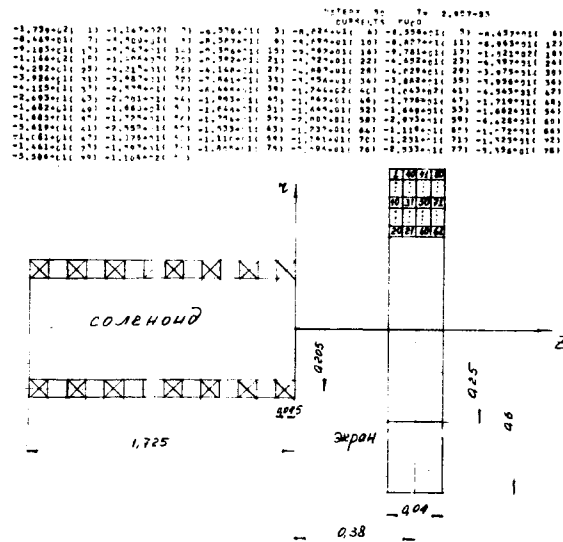


Рис. 1. Вверху - таблица распределения токов по экрану. Внизу - геометрия соленоида и экрана и разбиение экрана на витки.

ствием) в момент времени 3 мсек. На этом же рисунке изображена геометрия соленоида и экрана, а также разбиение экрана на кольца ( $N=80$ ).

Индукцию  $\vec{B}_1$  магнитного поля, создаваемую токами  $I_n(t)$ , находим из уравнения (2)<sup>/3/</sup>

Программа вычисления  $I_n(t)$ ,  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B$ , описана в работе<sup>/4/</sup>.

чика, чувствительности магнитометра. Суммарная погрешность измерений составила 2% в области полей 0,2-0,01 Т и 10% в области полей  $10^{-2}$  -  $5 \cdot 10^{-4}$  Т.

Результаты расчета измерений магнитного поля соленоида при напряжении на конденсаторной батарее  $4 \cdot 10^3$  В без учета экранов показаны на рис. 2. На рис. 3-6 приведены распределения суммарного поля ( $B = B_0 + B_1$ ) для различных типов экранов.

На рис. 2-6 показаны значения поля в момент времени  $t = T/4 = 1,2 \cdot 10^{-2}$  сек.

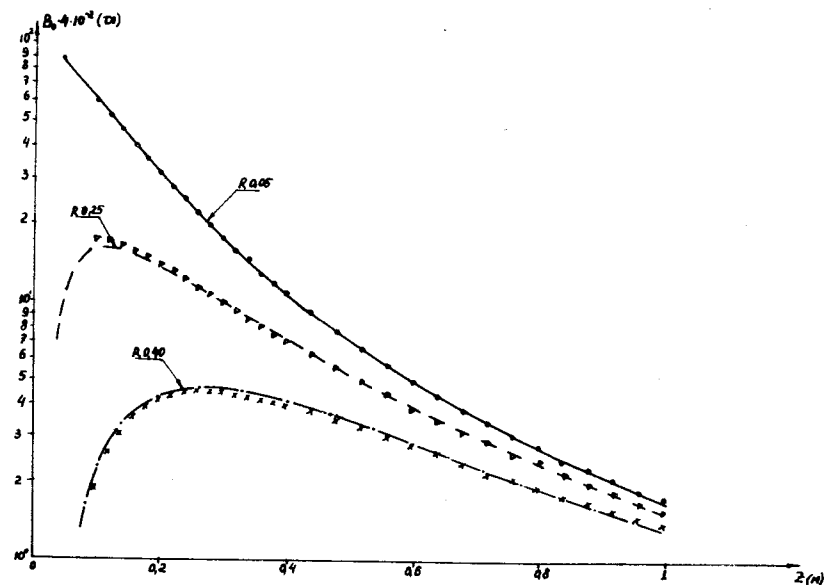


Рис. 2. Распределение поля  $B_0$  соленоида в зависимости от  $z$  в момент времени  $t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  сек. —, — —, — · — — расчетные кривые для радиусов 0,05 м; 0,25 м; 0,4 м.  $\circ \circ \circ$ ,  $\nabla \nabla \nabla$ ,  $\times \times \times$  — измеренные значения поля на тех же радиусах.

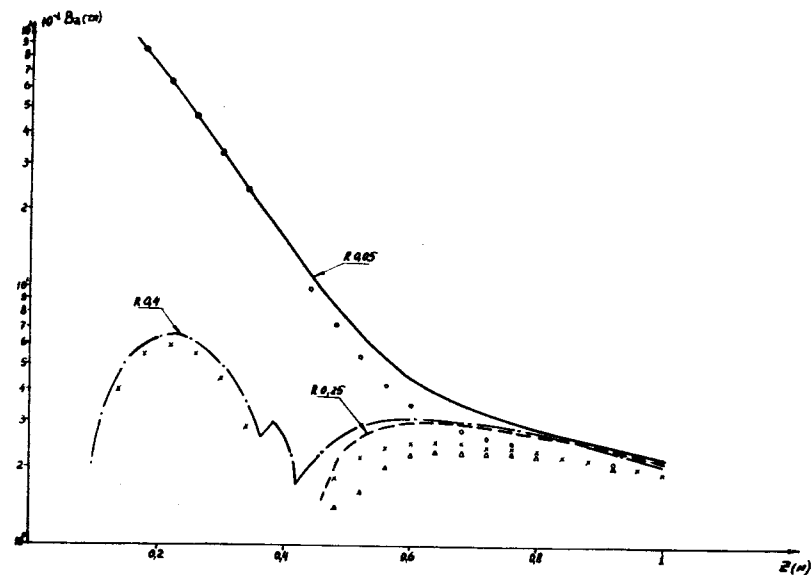


Рис. 3. Распределение поля  $B_z = B_{z0} + B_{z1}$  в зависимости от  $z$  в момент времени  $t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  сек. Экран в виде диска с отверстием  $\phi 1,20 \times \phi 0,50 \times 0,02$  (м) установлен на  $z = 0,39$  м. Остальные обозначения те же, что и на рис. 2.

Как видно из рисунков, результаты расчета согласуются с экспериментом с точностью 2-5% в области полей  $10^{-1}$  -  $10^{-2}$  Т. При значениях полей  $10^{-3}$  Т согласие результатов 10-20%. Анализируя полученные результаты, можно заметить: а) увеличение толщины диска вдвое не играет существенной роли, если интересующая область экранирования лежит в районе 0,5 м от экрана; б) эффективные значения обечайки и диска примерно одинаковы в указанной области; в) для экрана в виде диска с отверстием в этой же области поле слабо зависит от радиуса отверстия и существенно зависит от внешнего радиуса экрана.

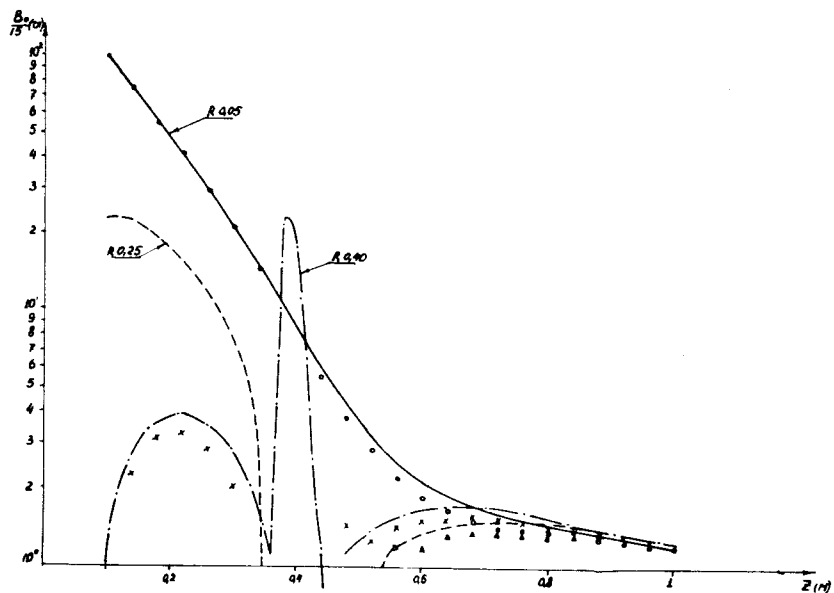


Рис. 4. Распределение поля  $B_z = B_{z0} + B_{z1}$  в зависимости от  $z$  в момент времени  $t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  сек. Экран в виде диска с отверстием  $\phi 1,20 \times \phi 0,50 \times 0,04$  (м) установлен на  $z = 0,38$  м. Остальные обозначения те же, что и на рис. 2.

Сравнение результатов расчета с экспериментом позволяет сделать вывод, что указанный метод можно использовать при расчете экранирующих действий экранов аксиально-симметричной формы для различных задач, требующих учета экранирования квазистационарного магнитного поля. Описанный метод расширяет возможности известных методов расчета <sup>17</sup>, поскольку в цитируемых работах величина скин-слоя предполагается значительно больше толщины экрана.

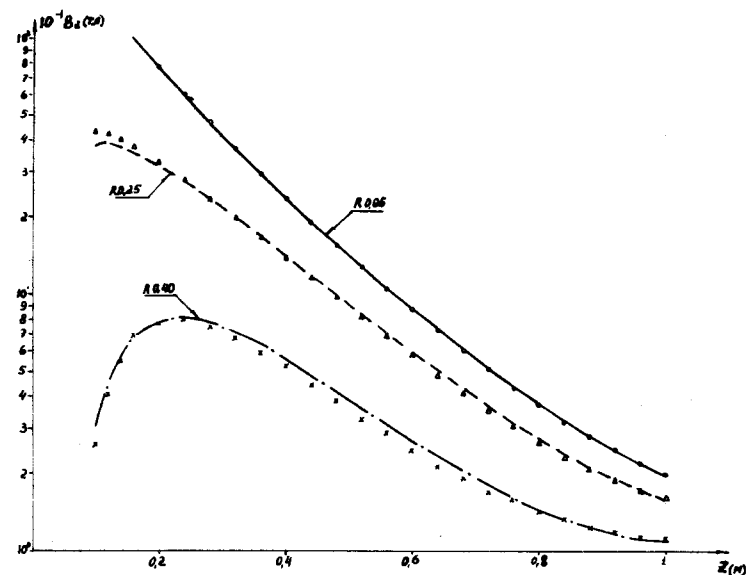


Рис. 5. Распределение поля  $B_z = B_{z0} + B_{z1}$  в зависимости от  $z$  в момент времени  $t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  сек. Экран - обечайка размером  $\phi 1,200 \times \phi 1,192 \times 0,800$  (м),  $z = 0,27$  - расстояние от экрана до соленоида. Остальные обозначения те же, что и на рис. 2.

#### IV. Выводы

При решении конкретной задачи экранирования, описанной во введении, можно обеспечить уровень внешнего поля в области сжатия кольца, не превышающий допустимого, выполнив торцовые стенки камеры из дюралюминия в виде дисков с отверстиями. Толщина дисков - 0,02 м, внешний диаметр - 2 м. Пользуясь этим методом, мы выбрали диаметр выводного отверстия, при котором искажение магнитного поля адгезатора в области стенки минимально.

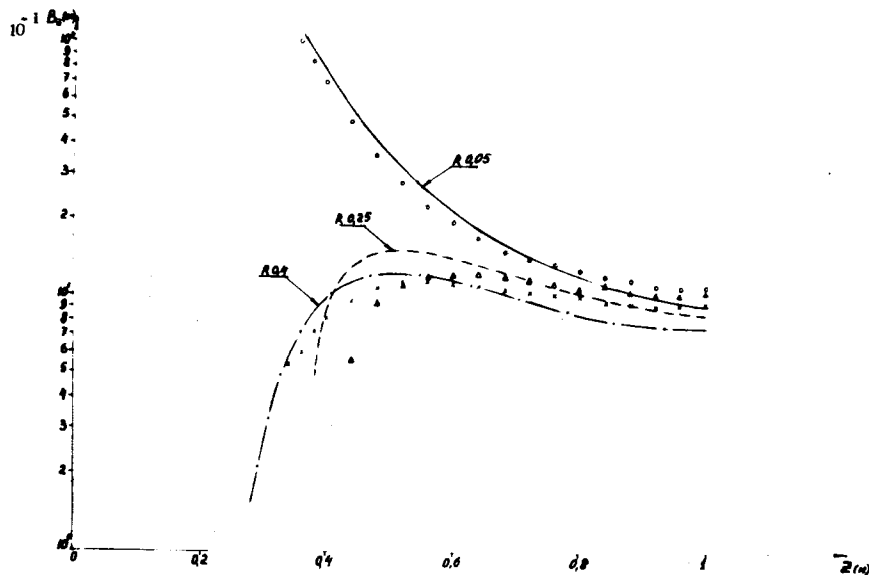


Рис. 6. Распределение поля  $V_z = V_{z0} + V_{z1}$  в зависимости от  $z$  в момент времени  $t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  сек для экрана - полукамеры: диск  $\phi 1,20 \times \phi 0,50 \times 0,04$  (м) и обечайка  $\phi 1,200 \times \phi 1,192 \times 0,800$  (м),  $z = 0,27$  - расстояние от экрана до соленоида.

Приведенная методика расчета полей позволяет получать распределение токов по сечению экрана. На рис. 7 приведено распределение токов в интервале времени  $0 \leq t \leq T/3$  для геометрии экрана и соленоида, показанной на рис. 1. Экран представлен в виде 4-х слоев по 30 витков в каждом слое. Система уравнений (6) интегрировалась с шагом  $\Delta t = T/1000$ . Обращает на себя внимание распределение токов в начальный момент времени: при  $t \leq 5 \Delta t$  токи в средних слоях оказываются отрицательными. Уменьшение шага интегрирования в 5 раз дает такое же распределение токов по экрану. Как уже указывалось выше, результаты измерений магнитного поля с учетом экрана хорошо согла-

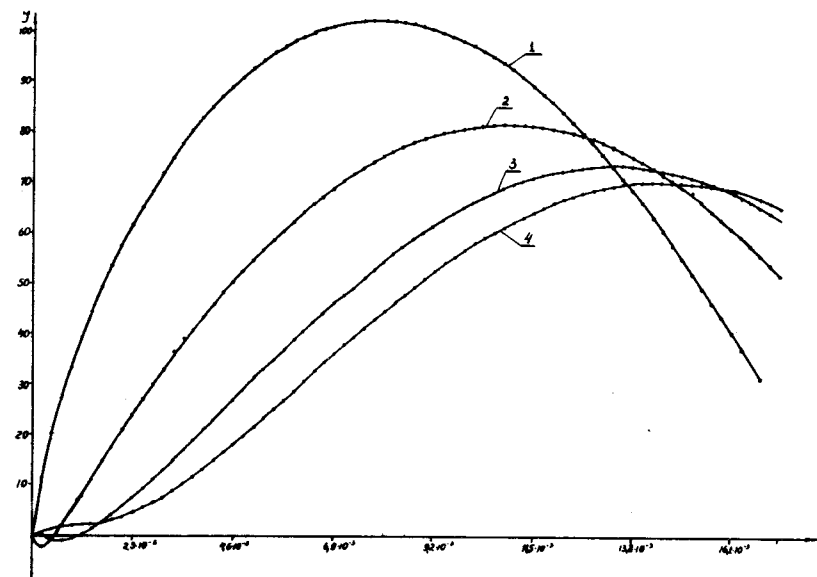


Рис. 7. Распределение токов в толстом экране. Геометрия экрана и соленоида показана на рис. 1. Кривые 1,2,3,4 дают зависимость токов средних витков соответственно 1,2,3 и 4 слоев.

суются с экспериментом для времен, близких к  $T/4$ . Мы считаем, что результаты распределения токов в экране при временах  $t \ll T/4$  требуют дополнительных исследований.

В заключение авторы выражают благодарность В.П.Саранцеву за полезные обсуждения, Л.В.Светову и А.А.Рашевской за помощь в проведении измерений и обработке результатов.



### Литература

1. Й.Габанец, Х.Гурач, И.Н.Иванов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-8353, Дубна, 1974.
2. В.Смайт. Электростатистика и электродинамика. М., ИЛ, 1954.
3. О.В.Тозони. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. Киев, "Техніка", 1967.
4. Ю.С.Дерендяев, А.К.Каминский. Депонированное сообщение ОИЯИ, БЗ-9-8392, Дубна, 1974.
5. Г.А.Иванов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-6983, Дубна, 1973.
6. В.М.Лачинов, В.К.Маковеев. Препринт ОИЯИ, Р9-8118, Дубна, 1974.
7. Ю.И.Алексахин и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7786, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 декабря 1974 года.