

M.69

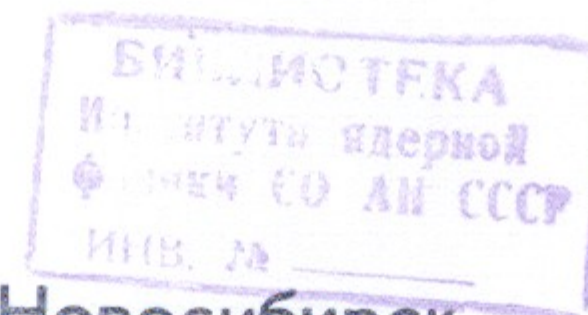
29

И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ ИЯФ 76-51

А.А.Михайличенко, В.Ф.Туркин

ОБ УСТАНОВЛЕНИИ ПОЛЯ В ШИХТОВАН -  
НОМ МАГНИТОПРОВОДЕ СИНХРОТРОНА



Новосибирск

1976

## А Н Н О Т А Ц И Я

В работе изучается процесс установления поля в шихтованном магнитопроводе. Показывается, что при межполюсных расстояниях, сравнимых с длиной магнитопровода по ярму, время установления поля практически не зависит от магнитной проницаемости железа, и составляет  $\sim 100$  нсек для типичного магнитопровода.

Экспериментально исследовано установление поля и показано согласие времени установления с расчетным. Исследуется способ экранировки магнитопровода от полей пучка.

Результаты работы могут быть полезны при исследовании не-стабильностей интенсивных релятивистских пучков.

## В в е д е н и е

Поведение железа в быстропеременных магнитных полях впервые изучал Э.Резерфорд. В работе /1/ им было показано, что железо обладает сильными магнитными свойствами в полях с частотой до 100 мгц.

В настоящее время подобные исследования стали актуальными в связи с работами по увеличению интенсивности синхротронов с коротким циклом ускорения. Особенностью этого типа ускорителей (к их числу относятся синхротроны Б-3М и Б-4 ИЯФ СО АН СССР) является камера с плохопроводящими стенками, обращенными к полюсам магнитопровода. Защитное проводящее покрытие имеет обычно толщину значительно меньшую, чем глубина скин-слоя для характерных частот пучка  $\nu_{x,z} \omega_0$ . Вследствие этого магнитное поле пучка не ограничивается камерой, а проникает в железо магнитопровода, формирующее ведущее поле. В работе /2/ показано, что в этом случае когерентный сдвиг частоты по отношению к свободному пространству увеличивается в  $2\gamma^2$  раз, что является недопустимым. Особенности процесса развития неустойчивости существенно зависят от временной характеристики намагничивания железа магнитопровода. Поэтому, для успешного изучения неустойчивостей интенсивных пучков частиц необходимо знать пространственно-временную связь между током пучка и возбуждаемым им полем на временах, сравнимых с периодом колебания частиц в камере.

В настоящей работе процесс установления поля в шихтованном магнитопроводе изучался путем возбуждения его током модели пучка. Короткий фронт возбуждающего импульса (2 нсек; длительность 0,5 мксек) позволяет определить переходную характеристику железа при установлении поля. Дается теоретическое описание процесса. Изучается способ экранировки магнитопровода от полей пучка.

При описании процесса установления поля следует выделить два характерных этапа. На первом этапе фронт волны возбуждения быстро доходит до краев листа. Характерный масштаб этих времен  $\sim L/c$ , где  $c$  — скорость света, а  $L$  — эффективная поперечная длина магнитопровода. Токи, возбужденные волной, циркулируют по каждому из листов в отдельности. После этого начинается эффективно развиваться процесс диффузии поля в листы железа. Именно этот процесс и является определяющим для полной картины установления. Постоянная времени диффузии для системы листов, изображенных на рис. I есть  $\tau_0 = (2\delta)^2 / (\pi^2 \alpha)$  при этом предполагается, что поле между листами постоянно.

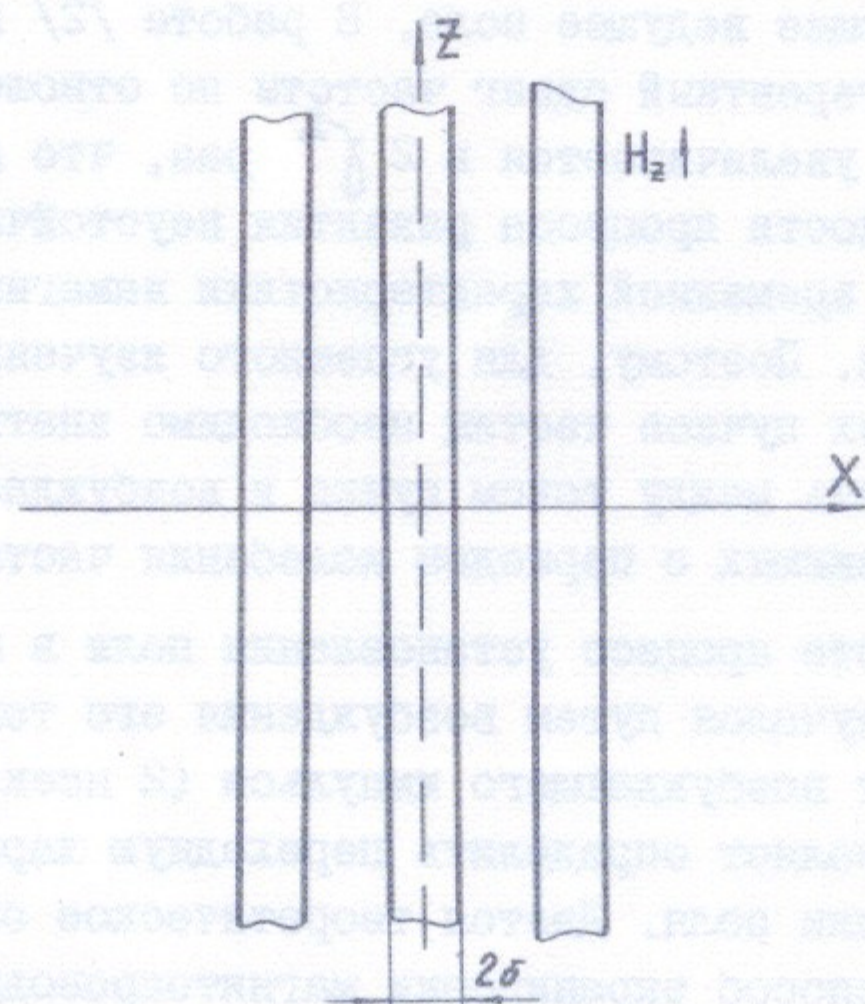


Рис. I

При наличии зазора поле между листами в  $M$  раз больше, чем его значение к моменту окончания переходного процесса, поэтому

следует ожидать, что время установления окажется равным  $\tau_0/M$ . Для железа с  $2\delta = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $\alpha = (\sigma \mu_0)^{-1} = 7,1 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>сек<sup>-1</sup>,  $\tau_0 = 200$  нсек. Экспериментально измеренное время установления (см. ниже) составляет 250 нсек.

## Глава 2. Методика измерения

Измерения распределения поля проводились на модели синхротрона Б-4. Пучок моделировался двадцатью проволоками, каждая из которых через сопротивление 1 ком соединялась параллельно с другими, так что результирующее сопротивление составляло 50 ом. Пространственное расположение проволок составляло 10 см по горизонтали и 2 см по вертикали, что весьма близко соответствует реальному пространственному распределению пучка при инжекции. Большая величина сопротивления, соединенного с проволокой (1 ком), сводит ток, наведенный в контуре модели пучка магнитным полем, к минимуму, так что искажение пространственного распределения поля пренебрежимо мало. На эту систему подавался импульс, сформированный трехэлектродным разрядником, работающим на коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 ом. Обратный ток замыкался широкими медными лентами. Были приняты меры к устранению электрических контактов между цепью тока модели пучка и магнитопроводом. Поперечное сечение магнитопровода и пучка изображено на рис.2.

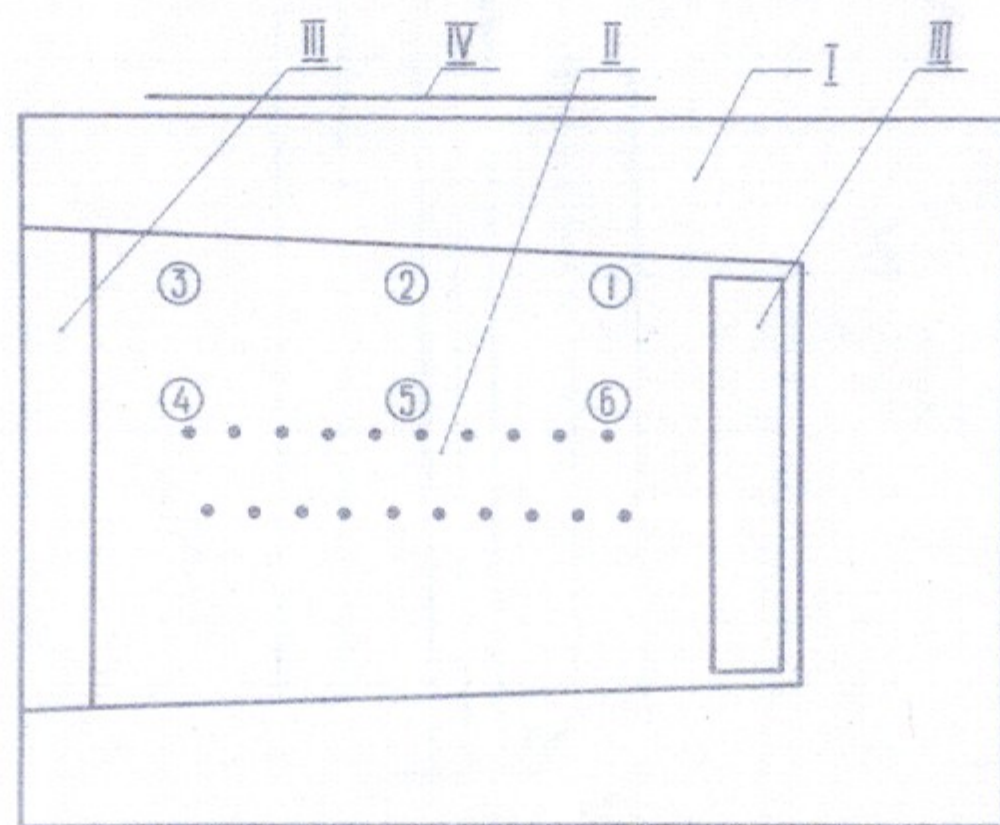


Рис.2. Поперечное сечение магнитопровода и модели пучка.  
I - магнитопровод, II - проволоки модели пучка,  
III - шины питания магнитопровода, IV - ленты,  
замыкающие обратный ток.

Магнитное поле регистрировалось одновитковой петлей, экранированной от электростатических наводок. Сигнал с петли по 75-омному кабелю подавался на пассивный интегратор с постоянной времени порядка 1,5 мксек. Длительность импульса, сформированного разрядником, составляла 500 нсек, фронт - 2 нсек. Суммарная величина тока, протекающего по проволокам, была равна в одном цикле измерений 200 А, в другом - 20 А. После интегрирования сигнал наблюдался на осциллографе С1-И1, синхронизованном с импульсом возбуждающего тока. В камере модели петля перемещалась с помощью координатного механизма. Для регистрации магнитного потока, проходящего через ярмо, использовалась экранированная петля, охватывающая треть площади его поперечного сечения.

## Глава 3. Измерение распределения магнитного поля

Измерялась как вертикальная, так и горизонтальная компоненты поля. Были выбраны характерные точки в пространстве между полюсом и проволоками, помеченные на рис.2 цифрами 1-6.

На рис.3а представлены осциллограммы проинтегрированных напряжений с петли в указанных точках, для вертикальной компоненты поля. На рис.3б для сравнения приведены сигналы в тех же точках, когда на полюса магнитопровода были проложены сплошные медные крышки. Сигналы в этих же точках при отсутствии железа (в свободном пространстве) качественно соответствуют изображенным на рис.3б.

На рис.4а показаны сигналы с петли, сориентированной для измерения горизонтальной компоненты поля; на рис.4б приведены сигналы в соответствующих точках, когда полюса отгорожены медными крышками. Формы сигналов в точках 4,5,6 в этом случае лишь незначительно отличаются от сигналов в соответствующих точках, измеренных в свободном пространстве.

Крышки из изоляционного материала, покрытые слоем аквадага по технологии, принятой в ИЯФ, пренебрежимо мало изменяют формы сигналов. Удельное сопротивление слоя аквадага составляет при этом 30 ом x см, при толщине покрытия около 0,1 мм.

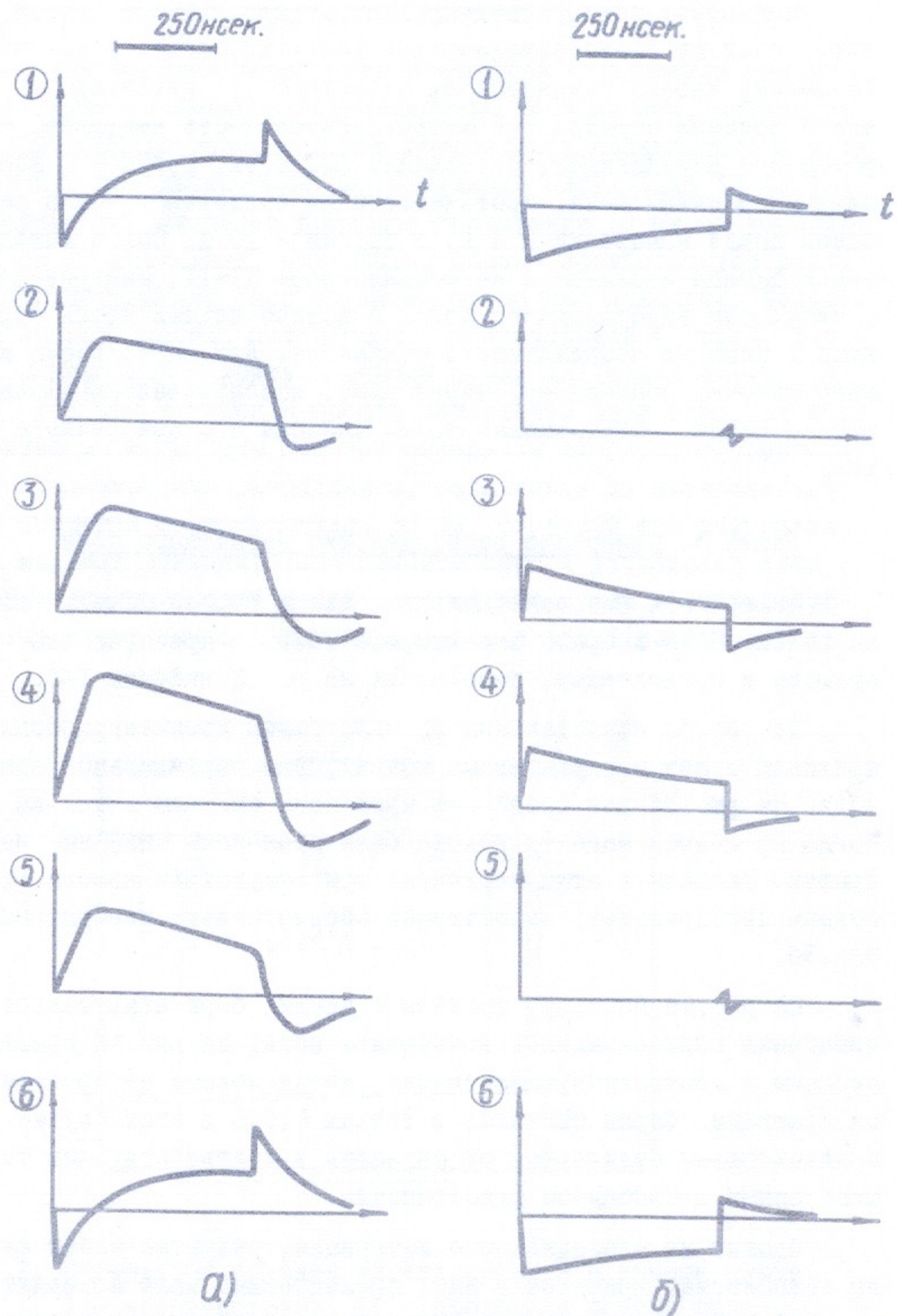


Рис.3. Сигналы в точках I-6 (см.рис.2). Петля сорентирована для измерения вертикальной компоненты поля. а - открытые полюса, б - полюса экранированы медными крышками. Спад вершины импульса обусловлен постоянной времени интегратора.

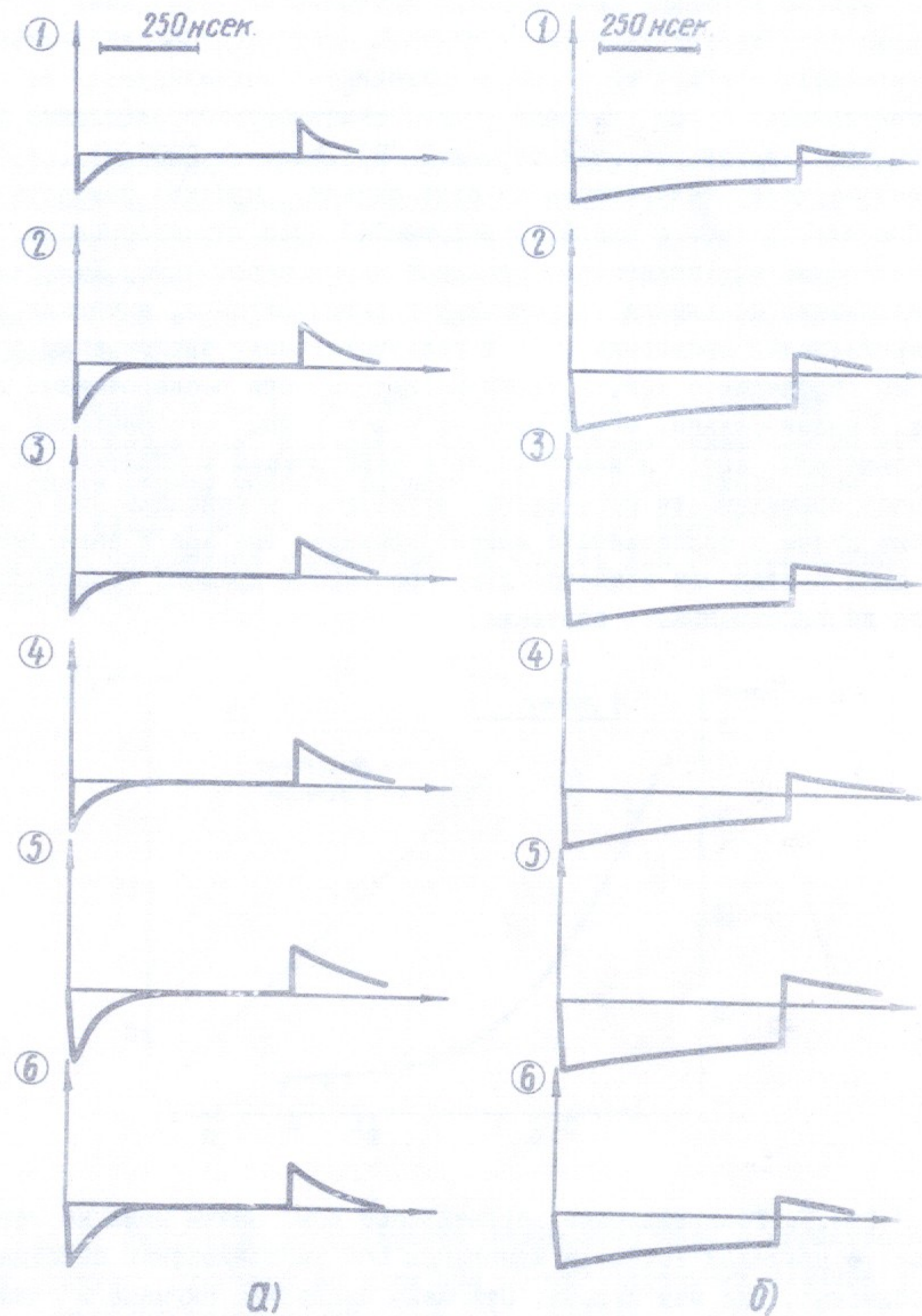


Рис.4. Сигналы в точках I-6 (см.рис.1). Петля сорентирована для измерения горизонтальной компоненты поля. а - открытые полюса, б - полюса экранированы медными крышками.

Особое внимание было уделено изучению влияния цепей, шунтирующих шины магнитопровода. Для этого шины с одной стороны закорачивались, а с другой к ним подключались цепи следующих типов: сопротивление 4 ома (выбрано равным волновому сопротивлению фидера питания магнита синхротрона Б-3М), емкость 2200 пф (характерная емкость токоподвода участка фидера), простая закоротка. Наблюдался сигнал с петли, охватывающей ядро магнитопровода. Закорачивание шин полностью устраняло поток через ядро. Емкость практически не влияла на величину и форму сигнала, а подключение сопротивления приводило лишь к незначительному затягиванию фронта по сравнению с тем, который наблюдался при раскороченных шинах. Следовательно, можно сделать вывод о том, что реальная шунтировка шин, которая имеет место в действующем ускорителе, не изменяет применимости полученных результатов к описанию взаимодействия пучка и шихтованного магнитопровода, так как в зависимости от типа шунтировки меняется лишь постоянная времени нарастания поля до максимального значения.

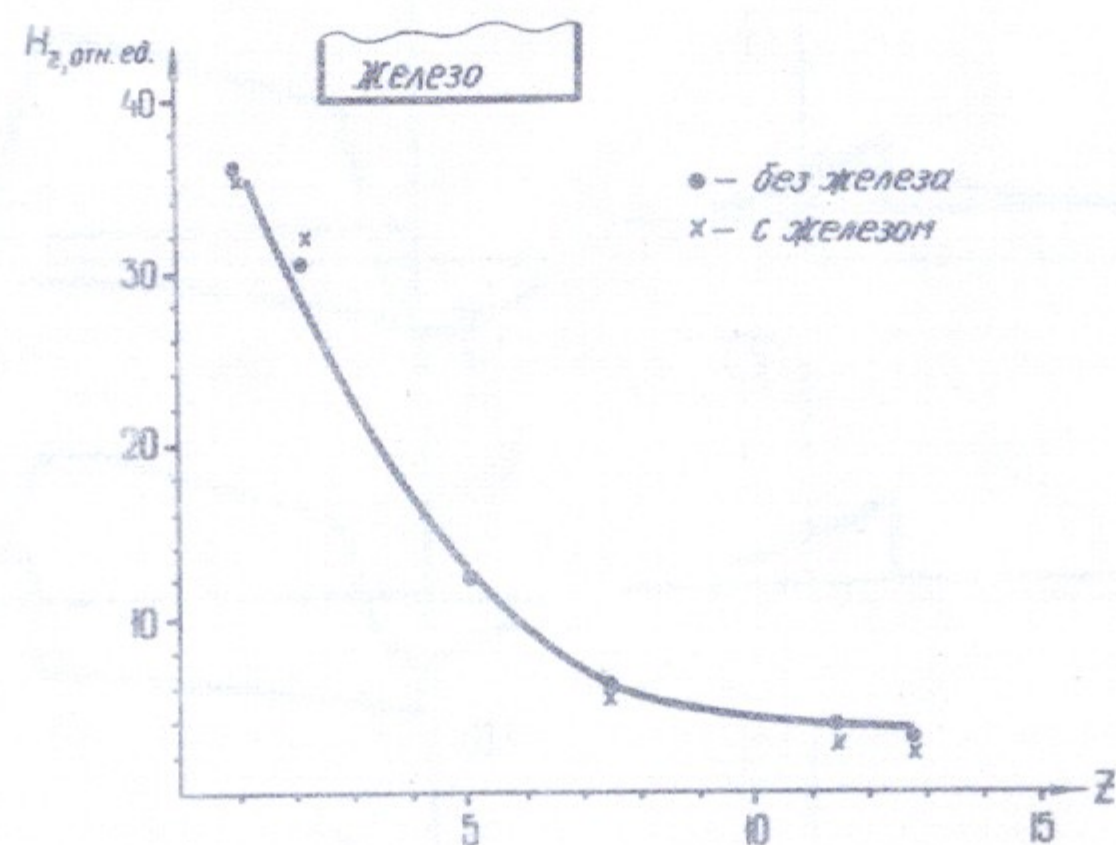


Рис.5. Распределение вертикальной компоненты поля по вертикали. В пределах точности измерения оба распределения совпадают в областях, где нет железа. Отложена амплитуда сигнала в самый первый момент.

Все выше приведенные формы сигналов получены при суммарном токе, протекавшем через проволоки, равном 200 А. Измерения при токе 20 А приводят к точно такой же качественной зависимости амплитуды поля от времени.

Для измерения ослабления магнитного поля шихтованным железом в самые первые моменты переходного процесса сравнивалось распределение поля по вертикали от полосковой линии, помещенной в магнитопровод, и в свободном пространстве. Линия имела импеданс 50 ом и была закорочена на конце. Оба распределения приведены на рис.5.

Как видно, в пределах экспериментальной точности эти распределения совпадают. Последнее обстоятельство указывает на то, что в самые первые моменты развития процесса магнитное поле проникает между листами железа фактически без ослабления. Форма сигнала аналогична приведенным на рис.4а для горизонтальной компоненты поля.

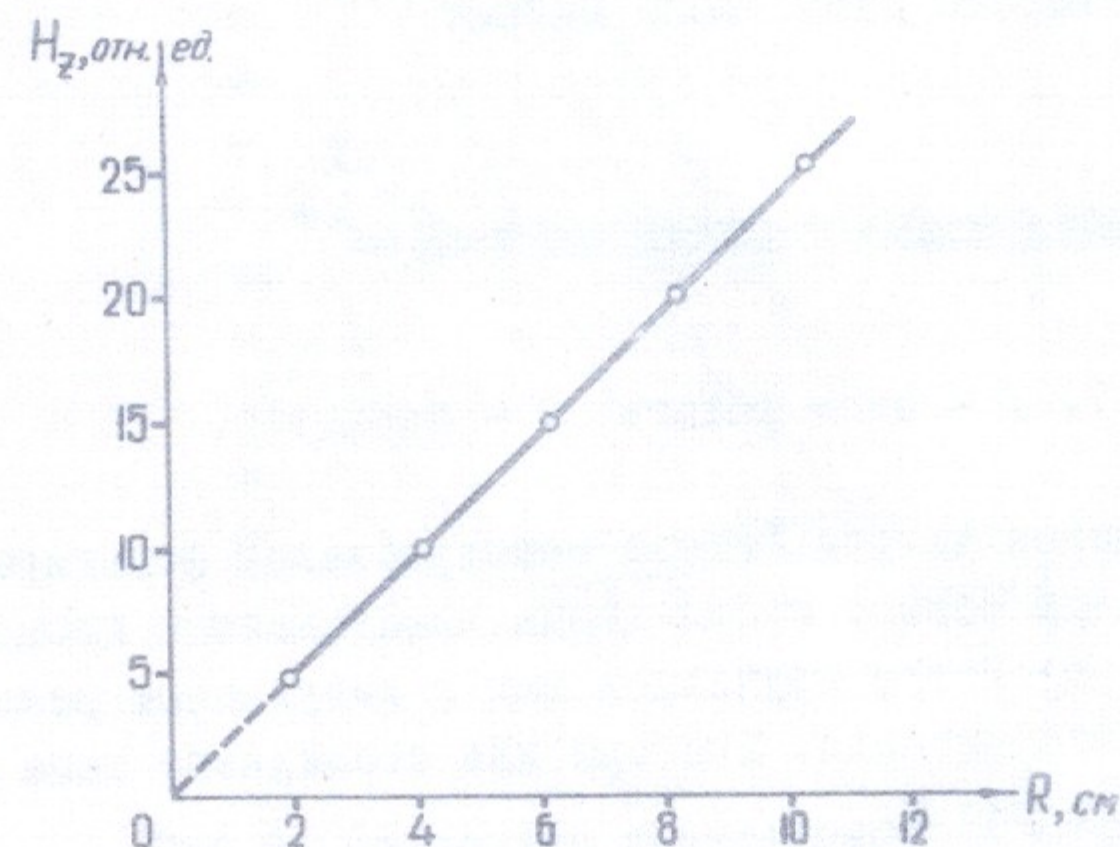


Рис.6. Амплитуда вертикальной компоненты поля в зависимости от радиуса. Отложена её величина (в относительных единицах) после окончания переходных процессов, спустя 200 нсек.

На рис.6 приведена кривая радиального распределения вертикальной компоненты поля модели пучка в камере. По оси абсцисс откладывалась амплитуда сигнала после окончания переходных процессов. Видно хорошее согласие распределения с тем, которое ожидается при равномерном распределении плотности тока по радиусу (как это и имеет место в нашем случае) при статической связи между током и магнитным полем.

#### Глава 4. Экранировка полей пучка

В связи с тем, что взаимодействие пучка с магнитопроводом велико (см. вышеупомянутую работу /2/), возникает необходимость в экранировке полюсов магнитопровода. Очевидно, что частотная характеристика ослабления экрана должна быть сложной, так как экран не должен искажать ведущие поля в камере, и в то же время вносить достаточное ослабление поля на частотах порядка бетатронных.

Экспериментально исследовались характеристики экрана, поперечное сечение которого изображено на рис.7<sup>х)</sup>



Рис.7. 1 - лист фольги, 2 - изолятор.

Для изготовления такого экрана использовался фольгированный диэлектрик ФДМТ-2 на основе стеклоткани, выпускаемый промышленностью. Частотные свойства изучались как в импульсном режиме, так и для гармонического сигнала. Приборы для последнего типа измерений изображены на рис.8.

На рис.9 представлен график зависимости ослабления от частоты. На том же графике для сравнения приведена зависимость ослабления поля несколькими слоями лавсана с напыленным слоем алюминия толщиной 0,135 микрона.

х) Подобная конструкция предложена В.Е.Балакиным.

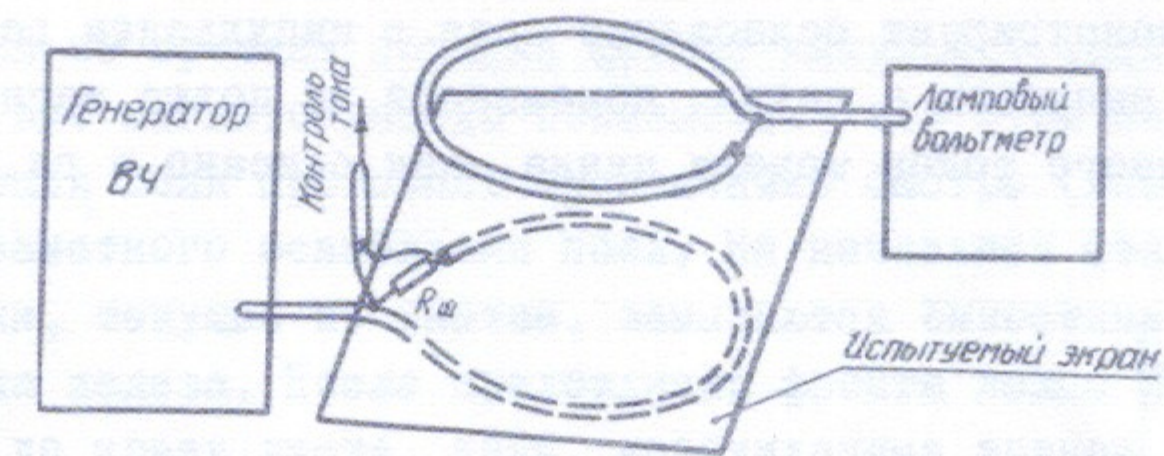


Рис.8. Измерение коэффициента ослабления поля для гармонического сигнала.

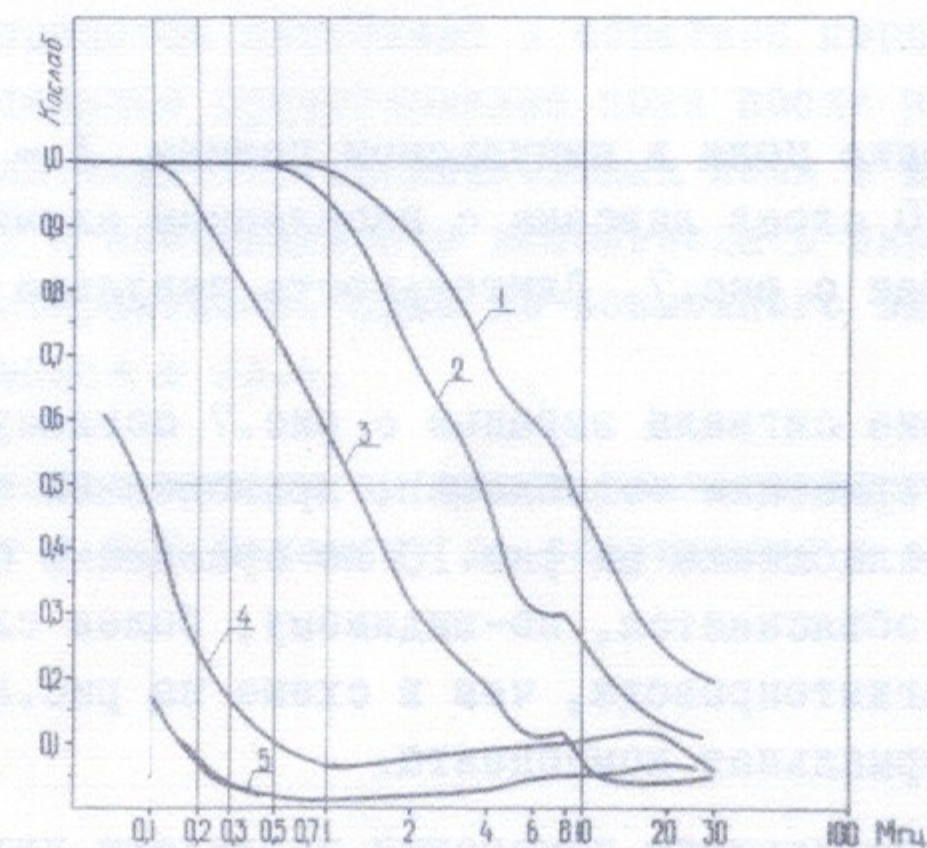


Рис.9. Частотные характеристики ослабления. 1 - один слой лавсана с напылением из алюминия, 2 - два слоя, 3 - три слоя, 4 - ослабление поля экраном (рис.7), 5 - экран в два слоя.



Рис.10 демонстрирует ослабление поля в импульсном режиме. Здесь показаны импульсы с петли, помещенной на полюс магнитопровода, возбуждаемого током модели пучка, как описано в гл.2.

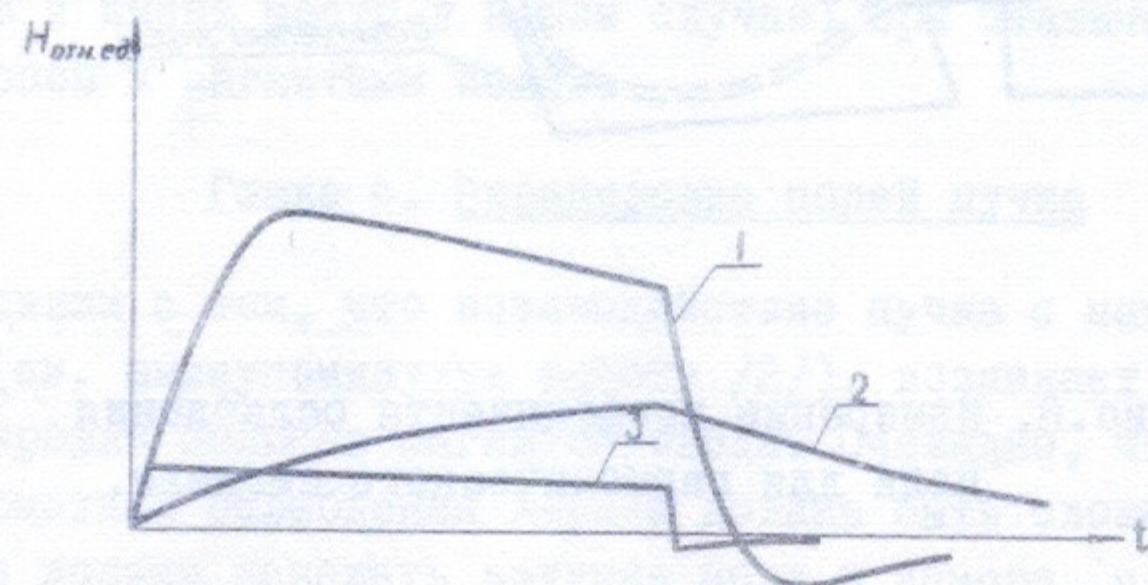


Рис.10. Ослабление поля в импульсном режиме. 1 - без экрана; 2-10 слоев лавсана с напыленным алюминием, 3 - экран с рис.7. Длительность импульса 500 нсек.

Равномерное ослабление сигнала экраном с рис.7 согласуется с видом частотной характеристики ослабления, приведенной на рис.9. Отличие в величине ослабления на рис.10 по сравнению с рис.9 для исследуемого экрана объясняется, по-видимому, более сложным видом поля в камере магнитопровода, чем в схеме на рис.8, где измерялась в основном нормальная компонента.

Таким образом, результаты измерений позволяют надеяться, что экран указанного вида (рис.7) существенно ослабит влияние магнитопровода на динамику пучка при инъекции.

## Глава 5. Обсуждение результатов

Расчеты и измерения указывают на следующий механизм установления поля в шихтованном магнитопроводе.

Сразу же после появления пучка в камере его магнитное поле начинает распространяться между листами железа. Используемая методика не позволяет детально разобраться в характере установ-

ления поля за времена порядка фронта импульса, однако, измерение поля вне магнитопровода показывает, что этот первый этап установления поля протекает чрезвычайно быстро (доли наносекунды) без заметного ослабления поля. На начальной стадии этого этапа токи, текущие по листам, замыкаются емкостным образом между листами железа. После прохождения фронта волны распространения поля до краев листа, токи, возбужденные волной, циркулируют по каждому из листов в отдельности. После этого начинает эффективно развиваться процесс диффузии поля в листы железа. Именно для этого этапа справедлив расчет, проведенный в первой главе. Малое время установления поля объясняется существенным (в  $M$ -раз) увеличением поля между листами железа в первоначальный момент времени по отношению к конечному значению, определяемому статической связью тока и поля. После окончания импульса, на его заднем фронте, процессы протекают в обратном порядке, чем обуславливается длительное существование поля после пролёта пучка (т.е. память). Нежелательность проникновения поля в железо магнитопровода приводит к необходимости использовать экраны со сложной частотной характеристикой. Один из возможного вида экранов такого рода исследовался в гл.4.

В заключение авторы выражают благодарность А.Н.Скринскому, Г.М.Тумайкину и В.Е.Балакину за обсуждения и замечания.

Л и т е р а т у р а

- /1/ Э. Резерфорд, избранные труды, стр. 7, "Наука", М., 1971 г.
- /2/ L. G. Lasslett, *On intensity limitations imposed by transverse space-charge effects in circular particle accelerators*, UCRL, 1963.
- /3/ Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля, "Мир", 1972 г.

---

Ответственный за выпуск С. Г. ПОПОВ  
Подписано к печати 9. VI - 1976 г. МН 02820  
Усл. I, 0 печ. л., тираж 150 экз. Бесплатно.  
Заказ № 51.

---

Отпечатано на ротационной машине в ИЯФ СО АН СССР, н. в.