

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

БР  $\frac{123}{263}$

препринт

А.Б.Нелидов, И.М.Самойлов, А.А.Соколов

**Характеристики магнитного поля  
безжелезного синхротрона БСБ**

НОВОСИБИРСК 1965

Бр  $\frac{123}{263}$

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

Препринт

А.В.Неядов, И.М.Самойлов, А.А.Соколов

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО  
СИНХРОТРОНА БСБ

г.Новосибирск - 1965 г.

1  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
СССР  
Имени В.И. ДЕНКИНА  
1967 г. — 26460

А н н о т а ц и я

Приведены результаты измерений магнитного поля безжелезного одновиткового синхротрона ВЭБ /I/ при питании магнита импульсами тока синусоидальной формы с временем нарастания  $\sim 10^{-3}$  сек.

Формирование вездущего магнитного поля в безжелезном синхротроне БСБ /1/ осуществляется за счет скин-эффекта в стенках колец магнита, ограничивающих ускорительную дорожку, рис.1а. При этом стенки колец обработаны по форме силовых линий идеального поля  $H$ . Радиус кривизны профиля стенок  $R$  выбирался, исходя из соотношения

$$R = \frac{\zeta}{n} \quad (1)$$

где  $\zeta$  - радиус стенки,  $n$  - показатель спада  $H$ . В нашем случае выбрано  $n = 0,4$ . Очевидно, что размер области устойчивости ( $0 < n < 1$ ) магнита и отклонения реального  $n$  от идеального, рассчитанного по (1), будет определяться как отношением высоты колец  $h$  к зазору ( $\Delta \zeta$ ) между ними, так и толщиной скин-слоя. Кроме того, дополнительные отклонения от идеального случая связаны с тем, что в магните синхротрона имеется ряд мест, в районе которых магнитное поле по необходимости искажено по сравнению с нормальным. К ним, прежде всего, относятся места разреза внутреннего кольца по диаметру. К одному из них, рис.1в<sub>1</sub>, подводится ток от конденсаторной батареи, а второй разрез, рис.1в<sub>2</sub>, замкнут перемычкой. Поле  $H$  должно быть возмущено также в районе вкладки, рис.1г, который выступает за контур профиля внешнего кольца на 1,2 см и имеет канал для ввода пучка электронов в камеру и канал для выпуска ускоренных электронов. Вводной канал в месте входа частиц в камеру имеет ширину 1 см, высоту 10 см, причем для механической прочности и уменьшения возмущения магнитного поля он имеет перегородки 4, рис.1г, толщиной 0,1 см, длиной 2 см, расположенные с шагом 1 см, так что прозрачность входного канала 0,9. Районами возмущения  $H$  могут быть также области камеры, где располагается резонатор, инфлектор, пояс Роговского, пикап-электроды и другие вспомогательные элементы.

Магнитные измерения позволяют определить размер реальной рабочей области магнита (область  $n \approx 0,4$ ), учесть диапазон изменения  $n$  в течение рабочего цикла  $n(t)$  (величина  $n$  может меняться из-за увеличения глубины прорастания  $H$  в толщу металла со временем, что эквивалентно изменению эффективной толщины скин-слоя  $\Delta$ ), выяснить степень искажения орбиты по отклонениям поля от азимутально симметричного. Кроме того, была проведена серия опытов по определению искажений  $H$ , вносимых металлическими пластинами определенной формы и толщины.

Для одновиткового магнита наиболее важным является вопрос об искажении  $H$  из-за несимметрии подвода тока к внутреннему витку. Для уменьшения азимутальных неоднородностей поля ток к витку должен подводиться в радиальном направлении с распределением тока  $y$  по высоте кольца в соответствии с реальным распределением  $H$  по периметру сечения кольца, т.е. с учетом условия на границе  $H = 4\pi j$  (в первом приближении равномерно по высоте). Очевидно, что необходимое распределение тока можно обеспечить, разделив "фидер", подводящий ток к магниту, на нужное число независимых каналов тока. Однако, такой путь сложен, поэтому решено было начать эксперименты с простейшего случая плоского малоиндуктивного экранированного фидера, внутренняя потенциальная шина которого показана на рис.16. При необходимости фидер допускает возможность подвода тока к магниту симметрично сверху и снизу. Крепление шин фидера к внутреннему кольцу показано на рис.1в<sub>1</sub>. Как показали измерения, см. ниже, эта простейшая конфигурация подводящей потенциальной шины, рис.16, оказывается удовлетворительной даже при подводе тока по фидеру только с одной стороны (сверху). Заметим, что в контактах фидера, перемычки и вкладыши с кольцами магнита прокладывается медная оплетка - 8 (или проволока  $\varnothing 0,6 + 0,8$  мм, см. рис.1в<sub>1</sub>), которая разжимается, при креплении этих элементов к кольцам, болтами. В противном случае появляются дополнительные искажения  $H$ , связанные с неоднородностью контактов по высоте.

Характеристики магнитного поля предварительно исследовались на модели магнита 1:1,84 при питании её в непрерывном режиме током с частотой 4 и 1 кГц (соответственно  $\Delta = 1,4$  и 2,8 мм). В результате этих предварительных измерений была выбрана высота колец основного магнита  $h = 30$  см (зазор между кольцами 10 см), при которой в области по  $Z$  большей 10 см обеспечивается хорошее качество магнитного поля. Поскольку скин-эффект влияет на магнитное поле ускорителя, работающего в импульсном режиме, несколько иначе, чем в случае питания магнита синусоидальным током, основные измерения  $H$  на синхротроне проводились в импульсном режиме.

Магнитные измерения делались по простейшей методике. С помощью электронного интегратора измерялись величины  $H_z$  или  $\Delta H_{z,z}$  (одной или двумя катушками), как правило, для трех моментов  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_m$  при синусоидально нарастающем токе в магните, рис. 2, который получается при разряде небольшой конденсаторной батареи

через балластную индуктивность на внутреннее кольцо магнита. Ошибки при измерениях  $H$  и  $\Delta H$  не превышают, как правило, 10%, а при измерениях показателя  $n - 5\%$ .

По ряду причин, см. /1/, полный рабочий цикл изменения магнитного поля ускорителя  $H(t)$  состоит из трех отрезков синусоид (вида рис.2), см. /2/, причем у первого отрезка  $t_{m1} = 360$  мксек; второй включается в момент  $t'' = t_{m1} + (\delta t)$  и имеет  $t''' = t_{m2} = 400 + 500$  мксек; для третьего (основной цикл) - момент  $t'' = t_{m2} + (\delta t)$  и  $t_{m3} = 950$  мксек; при этом  $(\delta t) = 5 + 20$  мксек. Очевидно, что требования к качеству магнитного поля будут более жесткими для момента инжекции  $t_i$ , поскольку при этом требуется максимальный размер дорожки с хорошим  $H$ . Для синхротрона ЕОБ при одном из вариантов  $H(t)$ , см. /2/,  $t_i = t_{m1} = 360$  мксек. Измерения для момента инжекции показывают, что размер области устойчивости ( $0 < n < 1$ ) составляет значительную долю  $\approx \frac{2}{3}$  от высоты магнита  $h = 30$  см, см. рис.3а. При этом средняя по  $z$  величина  $n$  мало отличается от расчетной  $n = 0,4$ , в довольно широкой области по  $Z$  (более чем  $\Delta Z \approx \pm 7$  см). Что касается изменения зависимостей, представленных на рис.3а для основного цикла ускорения, у которого  $t_{m3}$  в  $\approx 2,5$  раза больше чем  $t_{m1}$ , то они весьма малы, см. рис.3б. В диапазоне  $Z$  до  $\pm 5$  см кривые  $n = n(Z)$  для  $z = 37,5 + 39,5$  и для  $z = 41,5 + 44,5$  практически сливаются в две кривые, отличающиеся между собой на  $\Delta n = 0,06$ . Отклонение кривых рис.3б от рис.3а начинает заметно сказываться лишь в области  $|Z| > 6$  см, что естественно, так как с ростом  $t_m$  должен прежде всего уменьшаться размер области устойчивости. Незначительное отличие результатов рис.3а,б дает основания полагать, что конфигурация  $H$  будет оставаться практически пригодной для ускорения частиц с ростом величины  $t_m$  до нескольких мсек (например, при  $t_m = 5 \cdot 10^{-3}$  сек эквивалентный скин-слой  $\Delta \approx 1$  см, что все еще равно малой доле от зазора между кольцами магнита). Заметим, что при этом надо еще учесть затухание бетатронных и синхротронных колебаний, благодаря чему требуемый размер области с хорошим  $H$  будет уменьшаться во времени.

Недопустимо, чтобы при инжекции поле заметной величины прорастало во входной канал вкладыша, рис.1г, так как оно может заметно изменить угол  $\alpha_0$  входа в камеру пучка, как целого и, кроме того, создать разброс частиц в пучке по углам, что в том и другом случае



ухудшает эффективность однооборотной инжекции, см./3,4/. Рис.4 дает представление о величинах проникающего во вводной канал поля. Аналогичный вид имеют кривые в других районах канала. Заметим, что для момента  $t_m = 360$  мксек поле в канале увеличивает  $\alpha_0$  на  $1 + 1,5^\circ$ , и это уже необходимо учитывать при инжекции, см./4/, или следует в несколько раз уменьшить  $t_m$ , как и делалось, в одном из вариантов схемы питания магнита /2/.

Существенным является вопрос о возможности создания в одновитковом безжелезном магните ведущего поля  $H_z$  с малыми отклонениями  $\Delta H(\varphi)$  от азимутально симметричного. Прежде всего интерес представляет величину  $\Delta H(\varphi)$ , обусловленные принципиальными конструктивными элементами выбранного варианта магнита, а именно: вкладками и разрезами токонесущего внутреннего кольца. На рис.5, кр. А, возмущения поля от этих элементов, заметные по величине, но локализованные по азимуту, четко вырисовываются (районы  $\varphi \approx 95^\circ$ ;  $275^\circ$ ;  $345 + 360^\circ$ ) на фоне плавных изменений  $H$ , о которых, см. ниже. Заметим, что эти локализованные возмущения растут со временем (точки № 1,2,3 на рис.5), однако, даже в самом крайнем случае  $t_m = 950$  мксек искажения орбиты, обусловленные этими возмущениями, пренебрежимо малы.

Что касается плавных изменений  $H$ , то они могут быть вызваны неоднородностью проводимости металла  $B$ , деформациями внутреннего (или внешнего) кольца или смещением его как целого и, наконец, несимметричным подводом тока к витку. Заметим, что большие неоднородности  $B$  маловероятны (необходимо изменить  $B$  между участками в несколько раз), а отклонения зазора между кольцами магнита от номинального (100 м) не превышают  $\pm 0,3$  мм, см.рис.5 кр.Б, и ими также нельзя объяснить наблюдаемые  $\Delta H(\varphi)$ . С другой стороны, максимальное  $\Delta H$  можно связать с районом  $\varphi \approx 95^\circ$ , что естественно может быть обусловлено несимметрией подвода тока к внутреннему кольцу. Представленную на рис.5 зависимость  $\Delta H(\varphi)$  следует рассматривать скорее как иллюстрацию, дающую представление о степени влияния несимметрии подвода при простейшей конфигурации подводной потенциальной шине, рис.1б, поскольку подвод тока к витку можно выполнить более симметрично. Заметим, что подвод тока к магниту по двум каналам (сверху и снизу) требует усложнения фидера и этот путь является поэтому громоздким. Относительно других путей симметризации подвода тока ограничимся лишь одним замечанием. Оче-

видно, что уже сами по себе небольшие возмущения  $\Delta H$ , рис.5, можно еще уменьшить (по измерениям в 2-3 раза), несколько выравняв длины путей тока в подводной шине - сделав в шине разрез по линии X-X, как показано на рис.1б.

Следует отметить, что амплитуде первой гармоники на рис.5, кр.А соответствует смещение орбиты ( $\delta z$ )  $\sim 1$  см, что при эффективной радиальной апертуре 7,5 см является допустимым, однако, если предельный захваченный в камеру ускорителя заряд ограничен не поперечным, а продольным кулоновским взаимодействием частиц, то для повышения интенсивности существенно свести ( $\delta z$ ) до  $2 + 3$  мм, см./3/.

Все элементы ускорителя (кроме резонатора), располагающиеся в камере (инфлектор, пикап-эл. катоды, поле Роговского и др.), выполнены так, что они не вносят заметных искажений в  $H$ . Что касается резонатора, то по принципиальным причинам в конкретной конструкции возмущения от него значительны (составляют 1-3%) и простираются в области  $\varphi$  от  $100$  до  $180^\circ$  (при азимутальной протяженности резонатора  $\sim 40^\circ$ ), см.рис.5, пунктирные кривые. При этом в момент инжекции смещение орбиты от первой гармоники этого возмущения  $\approx 5$  мм. Заметим, что это возмущение можно уменьшить в несколько раз при более рациональной конструкции резонатора.

При конструировании неизбежно возникает вопрос о допустимых (с точки зрения возмущений поля) толщинах и конфигурациях металлических деталей тех или иных элементов машины, которые могут располагаться непосредственно в камере ускорителя. Очевидно, что число возможных вариантов деталей и их расположений слишком велико, чтобы дать рецепты даже для наиболее типичных случаев (кроме общих очевидных рекомендаций: минимальные толщины и площади и т.д.). Из экспериментальных результатов ограничимся приведенной на рис.6а,б, в иллюстрацией картины возмущения поля ( $H_z$ ) медными пластинами простейшей конфигурации, расположенными в камере при максимальном удалении их от медианной плоскости, см.рис.6а. Такое расположение пластин ограничено верхней и нижней крышками камеры, см./1/, и соответствует наиболее часто встречающимся случаям размещения конструктивных элементов в камере (например, резонатор, инфлектор и т.д.). Не останавливаясь на обсуждении результатов рис.6, ограничимся следующим замечанием. Часто для конструктивного

решения достаточно иметь пластины только сверху или снизу камеры (при этом возмущение уменьшается вдвое), однако в этом случае смещается медианная плоскость.

Вопрос об искажениях медианной плоскости очень важен с точки зрения выпуска частиц из ускорителя. Вместе с тем детальными измерениями  $H_z$  составляющей магнитного поля не проводилось, поскольку нетрудно избежать искажений медианной плоскости, выполнив конструкции всех элементов, находящихся в камере, симметричными относительно плоскости  $Z = 0$ . (Непосредственный контроль положения пучка в камере пробниками показывает, что отклонения медианной плоскости не превышают  $5 + 7$  мм). С другой стороны очевидно, что более тонкое исправление положения медианной плоскости для непосредственного нацеливания пучка в выходной канал ускорителя гораздо эффективнее вести в процессе экспериментов по выпуску, управляя положением пучка корректирующими возмущениями поля с помощью металлических пластин.

Результаты проведенных магнитных измерений с учетом замечаний, сделанных в тексте, показывают, что выбранный конструктивный вариант безжелезного магнита с единственным возбуждающим витком тока имеет в значительной области, равной  $\approx 0,4$  от высоты колец магнита, показатель спада поля близкий к расчетному и обладает малыми возмущениями магнитного поля, соответствующими искажениям орбиты  $\sim 3 + 5$  мм, а конструкция вспомогательных элементов ускорителя (резонатор, пояс Роговского и т.д.) может быть выполнена так, что каждый из этих элементов не внесет в орбиту заметных дополнительных искажений.

Авторы выражают благодарность Г.И.Будкеру и А.А.Наумову за советы, внимание и интерес к работе.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, П.И.Медведев, В.А.Мостовой, О.А.Нежевико, А.Б.Нелидов, В.С.Панасюк, И.М.Самойлов, А.А.Соколов.  
"Безжелезный одновитковый синхротрон БСБ". Направлено в ХТФ.
2. А.А.Лившид, А.Б.Нелидов, И.М.Самойлов, А.А.Соколов.  
"Система питания магнита безжелезного синхротрона БСБ". Направлено в ХТФ.
3. И.М.Самойлов, А.А.Соколов.  
"Влияние пространственного заряда на продольное движение частиц в ускорителях при инжекции". Направлено в ХТФ, регистрационный № 1671.
4. В.А.Мостовой, И.М.Самойлов, А.А.Соколов.  
"Схема однооборотной инжекции в безжелезном синхротроне БСБ". Направлено в ХТФ.



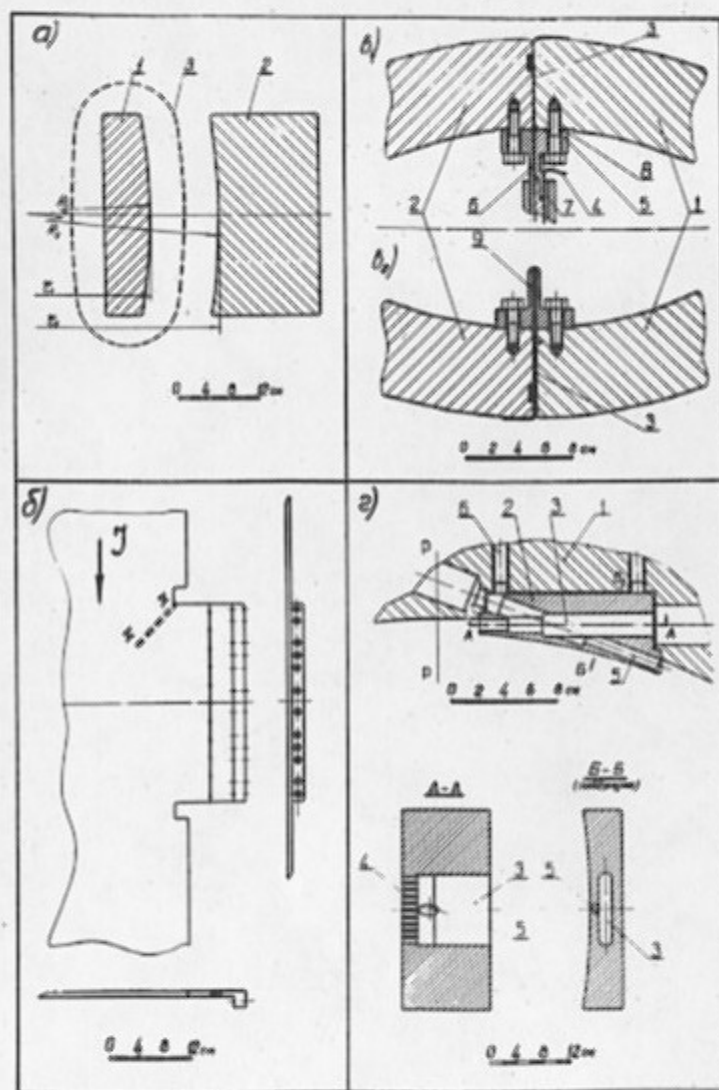


Рис.1. а) Профиль колец магнита, формирующих ведущее магнитное поле: 1 - внутреннее кольцо магнита, на которое разряжается конденсаторная батарея, 2 - внешнее короткозамкнутое кольцо магнита, 3 - силовая линия магнитного поля.  $r_1 = 36$  см;  $r_2 = 46$  см.

б) Конфигурация потенциальной линии фидера.

в<sub>1</sub>, в<sub>2</sub>) соответственно место подвода тока к внутреннему кольцу и перемычка, замыкающая половинки кольца (дано сечение магнита горизонтальной плоскостью): 1,2 - половинки внутреннего кольца магнита; 3 - изоляция (вакуумная резина толщиной 1 мм); 4 - изоляция (лакоткань); 5 - потенциальная линия "фидера"; 6,7 - экранирующие линии "фидера"; 8 - проволока (или оплетка); 9 - перемычка.

г) Вкладыши для впуска и выпуска пучка: 1 - внешнее кольцо магнита; 2 - вкладыши; 3 - впускной канал; 4 - перегородки канала; 5 - канал для выпуска; 6 - крепежные болты; PP - радиус перпендикулярный оси впускного канала.

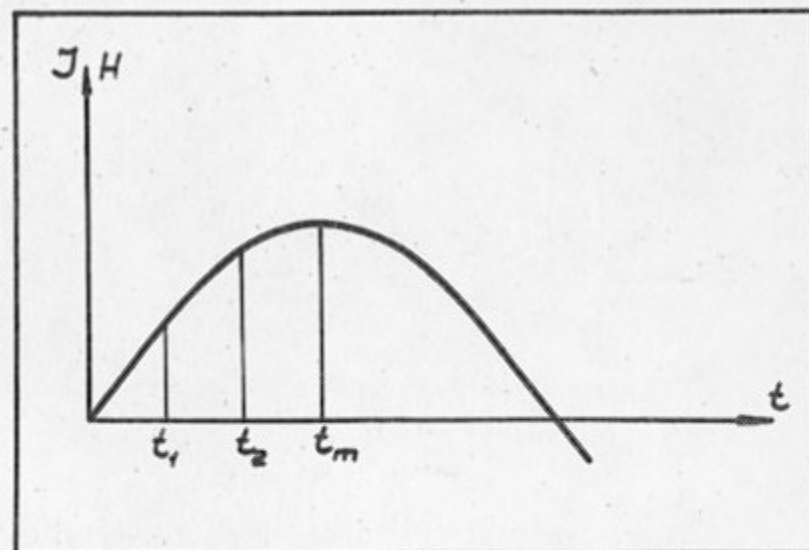


Рис.2. Ток и поле  $H$  магнита синхротрона при магнитных измерениях ( $J = J_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t$  при  $t \gg 0$ ).  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_m$  - моменты измерений (момент  $t_m$  совпадает с максимумом  $H$ ).



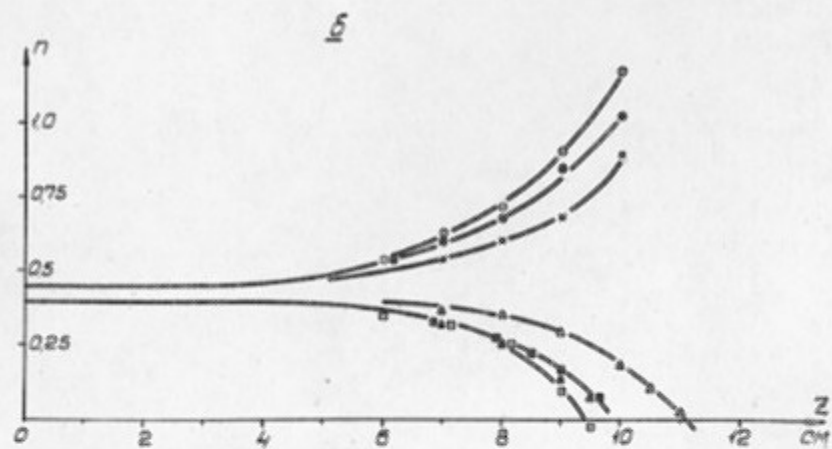
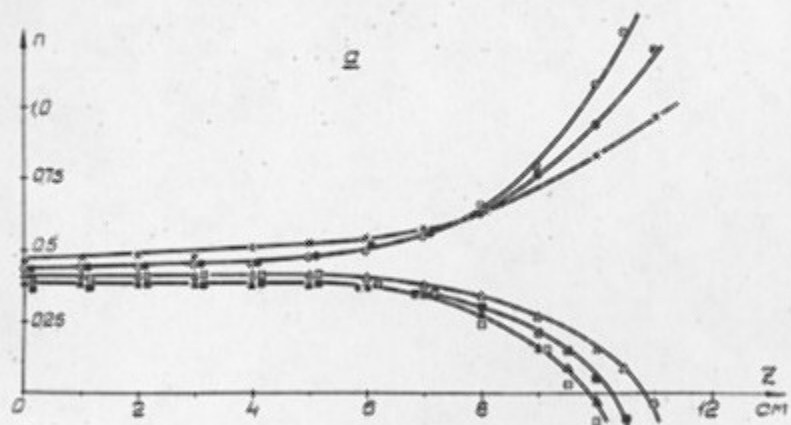


Рис.3а,б). Зависимость показателя спада поля  $n = n(z)$ , снятая для различных радиусов  $z$ . Импульс тока в магните вида рис.2. Измерения только в точке  $l = l_m$ . Для а)  $l_m = 360$  мксек, для б)  $l_m = 950$  мксек.

Знак	○	●	×	△	▲	□	■
$z$ (см)	37,5	38,5	39,5	41,5	42,5	43,5	44,5

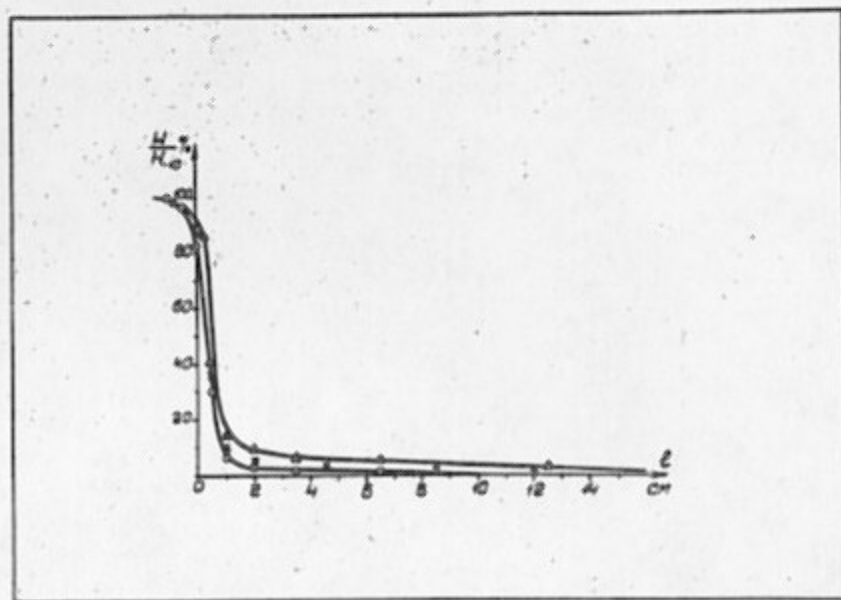


Рис.4. Проникающее поле вблизи оси вводного канала.  $l$  - отсчитывается от входной щели по оси канала внутрь вкладки. За 100% принято поле в камере в районе входной щели. Импульс  $H$  вида рис.2,  $l_m = 360$  мксек. Кривые сняты при длине перемычек входного канала равной 1 см.

Момент измерения, мксек	$l_1 = 160$	$l_2 = 260$	$l_m = 360$
Знак	○	×	△

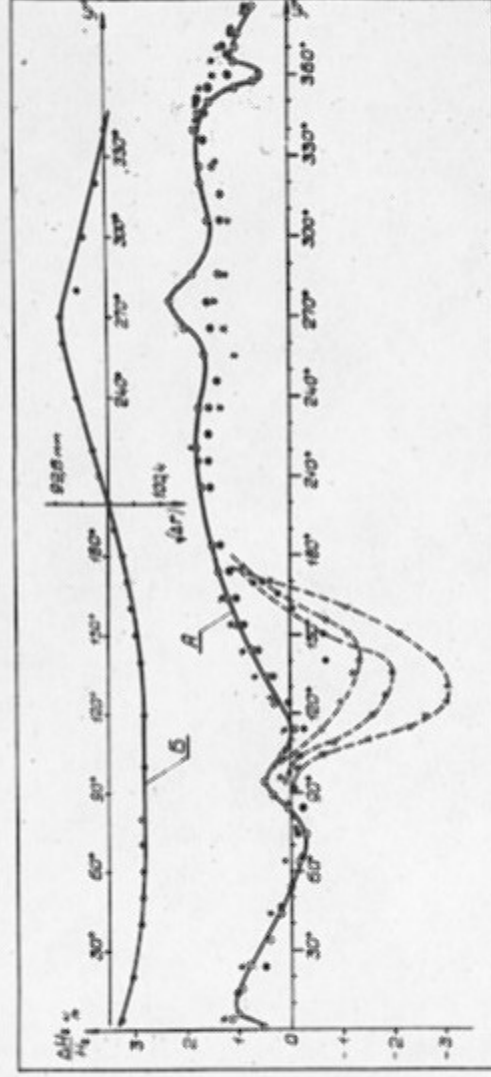
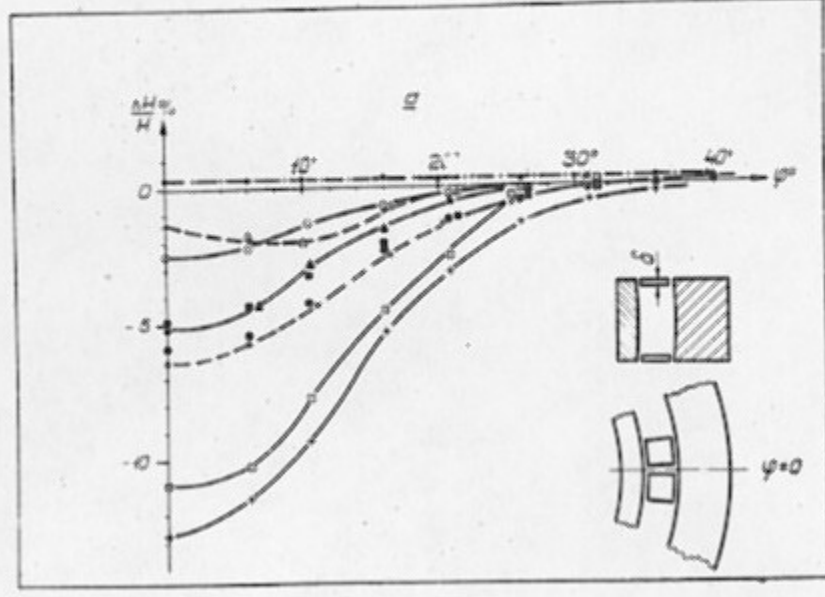
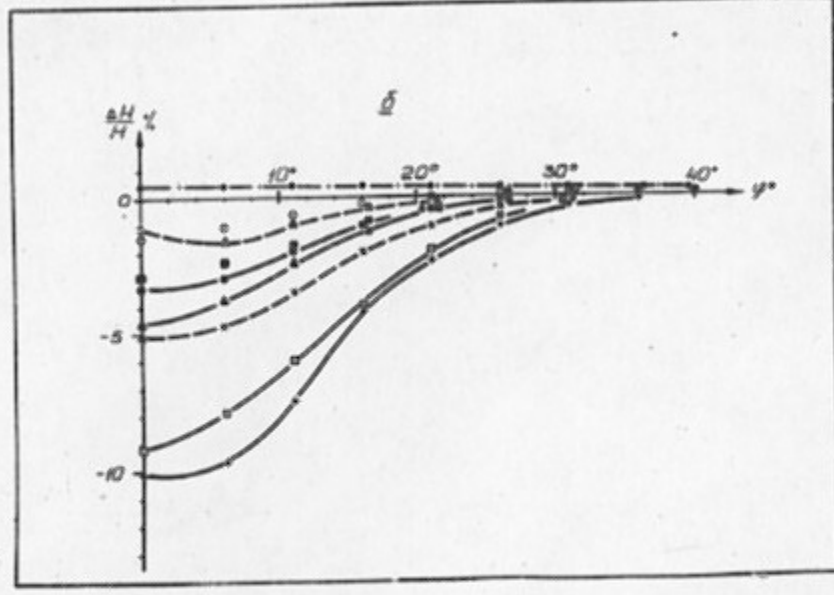


Рис. 5 Кр. А. Зависимость  $\frac{\Delta H}{H}$  от  $\psi$ . Азимут считывается от входной щели. Разрезан внутреннею катушка магнита располагается на  $\psi = 95^\circ$  (подвод тока) и  $\psi = 275^\circ$  (перемычка); вкладка —  $\psi = 345^\circ - 360^\circ$ . Измерения на  $z = 41$  см. Вид кривых для остальных  $z$  одинаков с кр. А. При измерениях  $\Delta H = 0$ .

№ п/п	1	2	3
Момент измерения, мсек	$t_1 = 200$	$t_2 = 950$	$t_3 = 360$
Знак	+	0	-

Точки № 1 и № 3, но обозначены иначе, дают представление об изменении возмущений  $H$  во времени. Для № 1 и № 2 — амплитуда  $H$  вида, рис. 2,  $t_1 = 200$  мсек,  $t_2 = 950$  мсек. № 3 — снят для поля инжекции вида рис. 2,  $t_3 = 360$  мсек. Кр. В — азимут между кольцами магнита в зависимости от азимута. Пунктирные кривые показывают возмущения поля, внесенные резонатором.



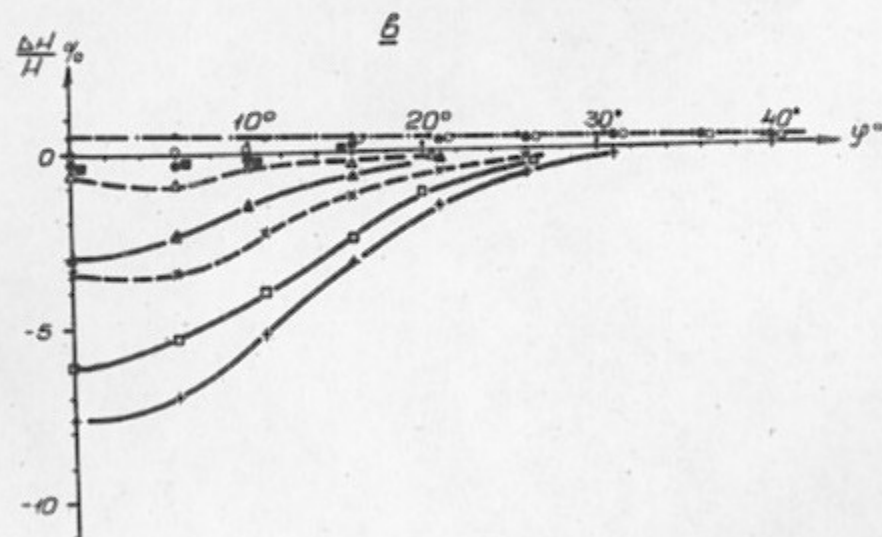


Рис.6(а), (б), (в). Зависимость искажений поля  $\frac{\Delta H}{H}$  %, вносимых медными пластинами, см.рис. 6(а). Импульс  $H_z$  вида рис.2,  $t_m = 950$  миксек. Случай: (а), (б), (в) измерены в моменты  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_m$  соответственно равные 200, 450, 950 миксек. Радиальный размер каждой пластины 8см. Во всех случаях, кроме 1,3,6 угол  $\psi$  отсчитывается от центра пластины. Зазор между пластинами по  $\psi$  равен 2мм (случай 3 и 6). При измерениях  $z = 0$ .

Параметры, при которых снимались кривые, приведены в таблице.

Точки № I ( — · — · — ) соответствует  $H$  без возмущающих пластин.

№ № по порядку	1	2	3	4	5	6	7	8	9
З н а к	— · — · —	○	■	●	▲	□	+	△	×
Размер пластин по $\psi$ , $L$ см.	0	8	8	16	8	8	16	8	16
Число пластин сверху	0	1	2	1	1	2	1	0	0
Число пластин снизу	0	1	2	1	1	2	1	1	1
Толщина пластин $\delta$ см	0	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

---

Ответственный за выпуск НЕЖИВЕНКО О.А.

---

Отпечатано на ротационной машине в ИЯФ СО АН СССР  
Тираж - 150 экз. Бесплатно