

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО СИНХРОТРОНА БСБ

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

Приведены результаты измерений магнитного поля безжелезного одновиткового синхротрона БСБ [1] при питании магнита импульсами тока синусоидальной формы с временем нарастания  $\sim 10^{-3}$  сек.

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

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

где  $r$  — 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), будут определяться как отношением высоты колец  $h$  к зазору ( $\Delta r$ ) 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. 1,  $\nu_1$ ) подводится ток от конденсаторной батареи, а второй разрез (рис. 1,  $\nu_2$ ) закорочен перемычкой. Поле  $H$  должно быть возмущено также в районе вкладыша (рис. 1,  $\zeta$ ), 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, высоту 10 см, причем для механической прочности и уменьшения возмущения магнитного поля он имеет перегородки  $\zeta$  (рис. 1,  $\zeta$ ) толщиной 0.1, длиной 2 см, расположенные с шагом 1 см. Районами возмущения  $H$  могут быть также области камеры, где располагаются 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  $H(t)$  (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 и, кроме того, получить представление о допустимых, с точки зрения возмущений поля, толщинах и конфигурациях металлических деталей, которые могут располагаться непосредственно в камере ускорителя.

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  $I$  по высоте кольца в соответствии с реальным распределением  $H$  по пери-

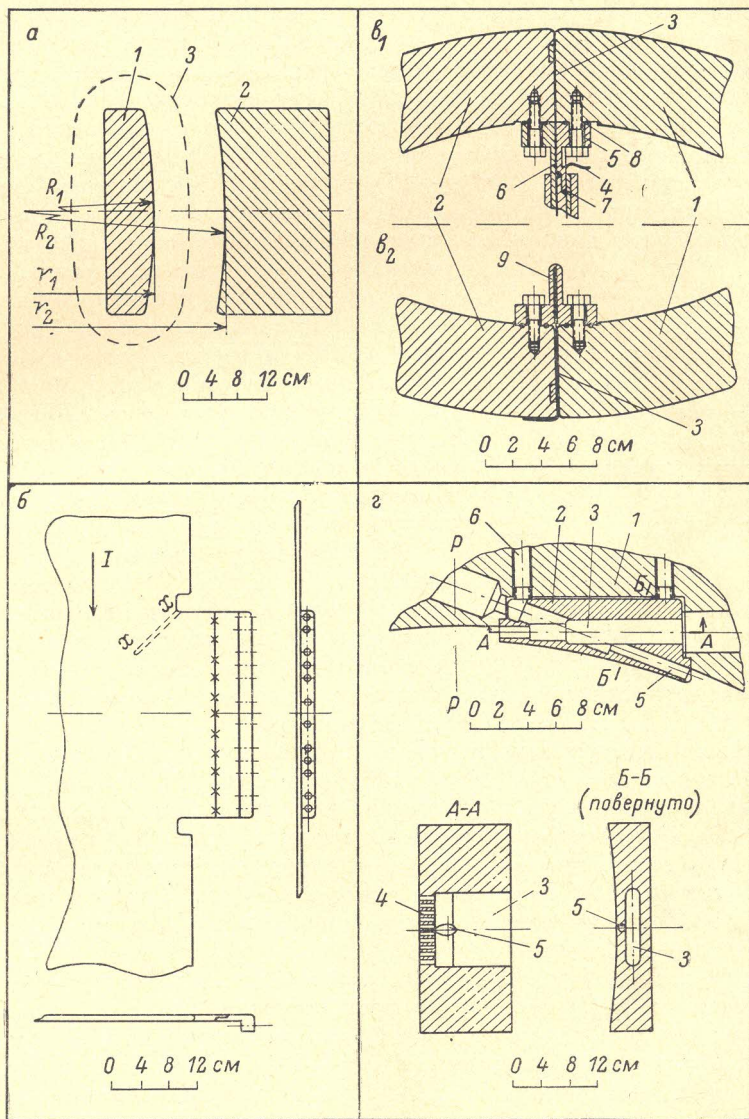


Рис. 1.

*a* — 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;  $r_1 = 36$ ,  $r_2 = 46$  см. *б* — конфигурация потенциальной шины фидера.  $v_1$ ,  $v_2$  — 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 шина „фидера“; 6, 7 — экранирующие шины „фидера“; 8 — проволока (или оплетка); 9 — перемычка. *г* — вкладыш для впуска и выпуска пучка: 1 — внешнее кольцо магнита; 2 — вкладыш; 3 — впускной канал; 4 — перегородки канала; 5 — канал для выпуска; 6 — крепящие болты.  $PP$  — радиус, перпендикулярный оси впускного канала.

метру 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 ширина которого показана на рис. 1, б. При необходимости фидер допускает возможность подвода тока к магниту симметрично сверху и снизу. Крепление шин фидера к внутреннему кольцу показано на рис. 1, в<sub>1</sub>. Как показали измерения (см. ниже), эта простейшая конфигурация подводящей потенциальной шины (рис. 1, б) оказывается удовлетворительной даже при подводе тока по фидеру только с одной стороны (сверху). Заметим, что в контактах фидера, перемишки и вкладыша с кольцами магнита прокладывается медная оплетка  $\delta$  (или проволока  $\varnothing 0.6 \div 0.8$  мм) (рис. 1, в<sub>1</sub>), которая разжимается при креплении этих элементов к кольцам, болтам. В противном случае появляются дополнительные искажения  $H$ , связанные с неоднородностью контактов по высоте.

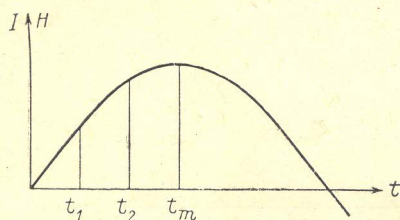


Рис. 2. Ток и поле  $H$  магнита синхротрона при магнитных измерениях ( $I = I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t$  при  $t \geq 0$ ).

$t_1, t_2, t_m$  — моменты измерений (момент  $t_m$  совпадает с максимумом  $H$ ).

Характеристики магнитного поля предварительно исследовались на модели магнита 1:1.84 при питании ее 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  $\Delta H_{z,r}$  (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  $t_{m2} = 400 \div 500$  мксек.; для третьего (основной цикл) — момент  $t''' = t_{m2} + (\delta t)$  и  $t_{m3} = 950$  мксек.; при этом  $(\delta t) = 5 \div 20$  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 БСБ 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 (рис. 3, а). При этом средняя по  $r$  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. 3, а для основного цикла ускорения, у которого  $t_m$  в  $\approx 2.5$  раза больше, чем  $t_{m1}$ , то они весьма малы (рис. 3, б). В диапазоне  $z$  до  $\pm 5$  см кривые  $n = n(z)$  для  $r = 37.5 \div 39.5$  и для  $r = 41.5 \div 44.5$  практически сливаются в две кривые, отличающиеся между собой на  $\Delta n = 0.06$ . Отклонение кривых рис. 3, б от рис. 3, а начинает заметно ска-

зываются 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. 3, а, б дает основания полагать, что конфигурация  $H$  будет оставаться практически пригодной для ускорения частиц с ростом величины  $t_m$  до нескольких миллисекунд (например, при  $t_m = 5 \cdot 10^{-3}$  сек. эквивалентный скин-слой  $\Delta \approx 1$  см, что все еще равно

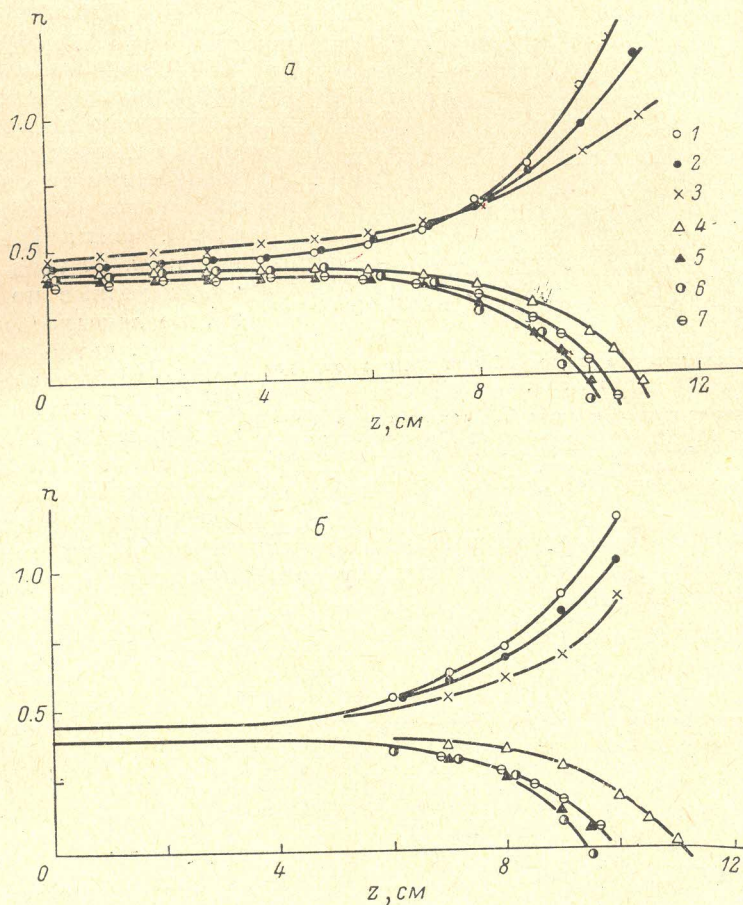


Рис. 3. Зависимость показателя спада поля  $n = n(z)$ , снятая для различных радиусов  $r$ .

Импульс тока в магните вида рис. 2. Измерения только в точке  $t = t_m$ . Для а -  $t_m = 360$ , для б -  $t_m = 950$  мксек.  $r$  (см): 1 - 37.5, 2 - 38.5, 3 - 39.5, 4 - 41.5, 5 - 42.5, 6 - 43.5, 7 - 44.5.

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. 1, 2), 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  $1 \div 1.5^\circ$ , и это уже необходимо учитывать при инжекции (см. [4]) или следует в не-

сколько 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 представляют величины  $\Delta H(\varphi)$ , обусловленные принципиальными конструктивными элементами выбранного варианта магнита, а именно: вкладышем и разрезами токонесящего внутреннего кольца.

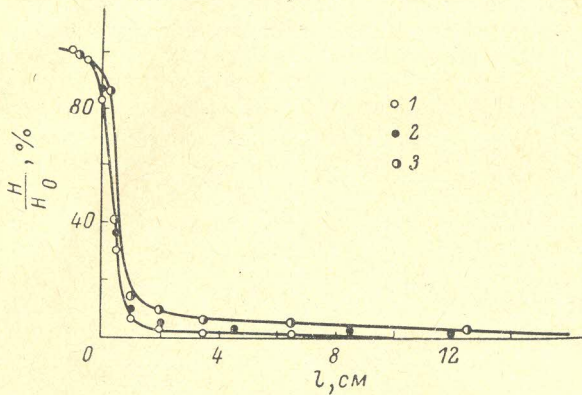


Рис. 4. Проникающее поле вблизи оси вводного канала.

$l$  отсчитывается от входной щели по оси канала внутрь вкладыша. За 100% принято поле в камере в районе входной щели. Импульс  $H$  вида рис. 2,  $t_m = 360$  мксек. Кривые сняты при длине перемычек входного канала, равной 1 см. Момент измерения (мксек.):  $t_1 = 160$  (1),  $t_2 = 260$  (2),  $t_m = 360$  (3).

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.

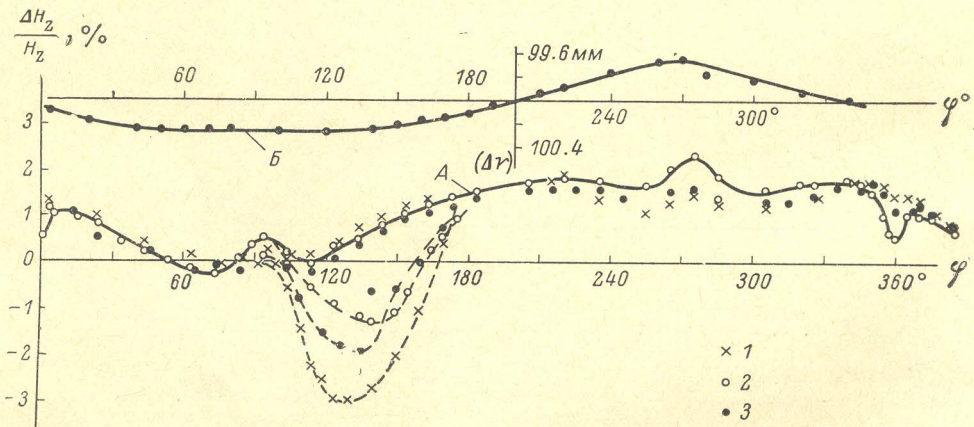


Рис. 5.

$A$  — зависимость  $\frac{\Delta H_z}{H_z}$  (%) от  $\varphi$ . Азимут отсчитывается от входной щели. Разрезы внутреннего кольца магнита располагаются на  $\varphi = 95^\circ$  (подвод тока) и  $\varphi = 275^\circ$  (перемычка); вкладыш  $\varphi = 345 + 360^\circ$ . Измерения на  $r = 41$  см. Вид кривых для остальных  $r$  одинаков с кривой  $A$ . При измерениях  $z = 0$ . Момент измерения (мксек.):  $t_1 = 200$  (1),  $t_m = 950$  (2),  $t_m = 360$  (3). Точки на кривых дают представление об изменении возмущений  $H$  во времени. Для кривых 1 и 2 импульс  $H$  вида рис. 2,  $t_m = 950$  мксек. Кривая 3 снята для поля инъекции вида рис. 2,  $t_m = 360$  мксек.  $B$  — зазор между кольцами магнита в зависимости от азимута. Штриховые кривые показывают возмущения поля, вносимые резонатором.

Что касается плавных изменений  $H$ , то они могут быть вызваны неоднородностью проводимости металла  $\sigma$ , деформациями внутреннего (или внешнего) кольца или смещением его как целого и, наконец, несимметричным подводом тока к витку. Заметим, что большие неоднородности  $\sigma$  маловероятны (необходимы изменения  $\sigma$  между участками в несколько раз), а отклонения зазора между кольцами магнита от но-

минального (100 мм) не превышают  $\pm 0.3$  мм (рис. 5, кривая 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 подводящей потенциальной шины (рис. 1, б), поскольку подвод тока к витку можно выполнить более симметричным. 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. Очевидно, что уже сами по себе небольшие возмущения  $\Delta H$  (рис. 5) можно еще уменьшить (по измерениям в 2—3 раза), несколько выровняв длины путей тока в подводящей шине—сделав в шине разрез по линии  $x-x$ , как показано на рис. 1, б.

Следует отметить, что амплитуде первой гармоники на рис. 5 (кривая А) соответствует смещение орбиты ( $\delta r$ )  $\sim 1$  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 ( $\delta r$ ) до  $2 \div 3$  мм (см. [3]).

Все элементы ускорителя (кроме резонатора), располагающиеся в камере (инфлектор, пикап-электроды, пояс Роговского и др.), выполнены так, что они не вносят заметных искажений в  $H$ . Что касается резонатора, то по непринципиальным причинам в конкретной конструкции возмущения от него значительны (составляют 1—3%) и простираются в области по  $\varphi$  от 100 до 180° (при азимутальной протяженности резонатора  $\sim 40^\circ$ ) (рис. 5, штриховые 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 для наиболее типичных случаев (кроме общих очевидных рекомендаций: минимальные толщины и площади и т. д.). Из экспериментальных результатов ограничимся приведенной на рис. 6, а, б, в иллюстрацией картины возмущения поля ( $H_z$ ) медными пластинами простейшей конфигурации, расположенными в камере при максимальном удалении их от медианной плоскости (рис. 6, а). 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  $H_r$  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 непо-

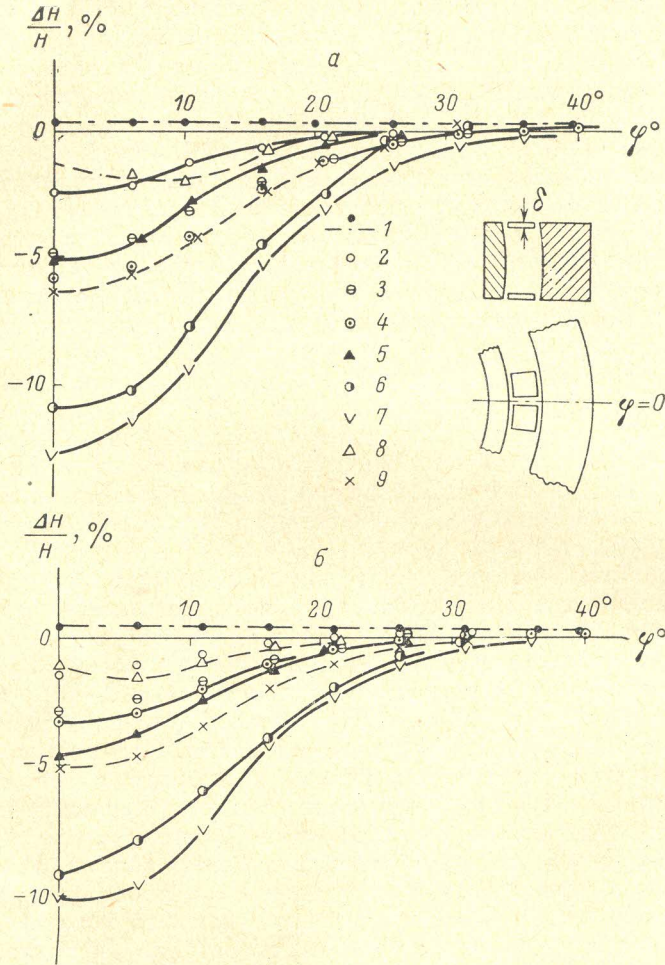


Рис. 6. Зависимость искажений поля  $\frac{\Delta H}{H}$  (%), вносимых медными пластинами,

а — импульс  $H_z$  вида рис. 2,  $t_m = 950$  мксек. Случаи а, б, в измерены в моменты  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_m$ , соответственно равные 200, 450, 950 мксек. Радиальный размер каждой пластины 8 см. Во всех случаях, кроме 1, 3, б угол  $\varphi$  отсчитывается от центра пластины. Зазор между пластинами по  $\varphi$  равен 2 мм (3 и б). При измерениях  $z = 0$ . Параметры, при которых снимались кривые, см. ниже. Точки 1 соответствуют  $H$  без возмущающих пластин.

Номер кривой	Размер пластины по $\varphi$ , L, см	Число пластин сверху	Число пластин снизу	Толщина пластины $\delta$ , см
1	0	0	0	0
2	8	1	1	0.1
3	8	2	2	0.1
4	16	1	1	0.1
5	8	1	1	1.0
6	8	2	2	1.0
7	16	1	1	1.0
8	8	0	1	1.0
9	16	0	1	1.0

средственного нацеливания пучка в выходной канал ускорителя гораздо эффективнее вести в процессе экспериментов по выпуску, управляя положением пучка корректирующими возмущениями поля с помощью металлических пластин.

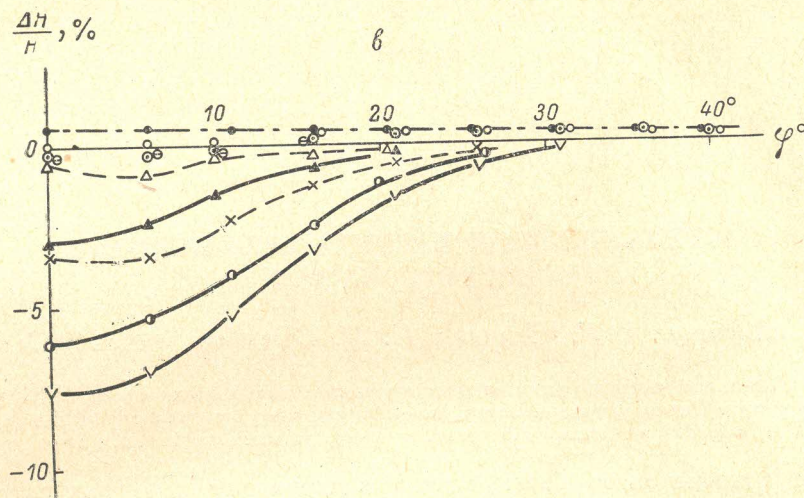


Рис. 6 (продолжение).

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  $\sim 0.4$  от высоты колец магнита, показатель спада поля, близкий к расчетному, и обладает малыми возмущениями магнитного поля, соответствующими искажениям орбиты  $\sim 3 \div 5$  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.

#### Литература

- [1] Г. И. Будкер, П. И. Медведев, Ю. А. Мостовой, О. А. Неженко, А. Б. Нелидов, Г. Н. Острейко, В. С. Панасюк, И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1523. — [2] А. А. Лившиц, А. Б. Нелидов, И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1544. — [3] И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, 2012, 1965. — [4] Ю. А. Мостовой, И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1550.

Поступило в Редакцию  
 27 сентября 1965 г.