

СЗ45еЗ
А-676

АНИЩЕНКО Н. Г.

+

АНИЩЕНКО, Н. Г. и др.
БІ-9-5374.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БІ-9-5374

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1970

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория высоких энергий

Н.Г.Анищенко, И.Б.Иссянский, Ю.А.Широв

Б1-9-5374

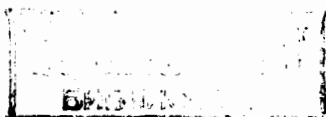
сз 45е3

А. 676

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО
СЕПТУМ-МАГНИТА ДЛЯ ВЫВОДА ПРОТОННОГО ПУЧКА
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА

с.ф. 3027

23 сентября 70 Кош



г. Дубна, 1970 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждаются возможности применения сверхпроводящих септум-магнитов для медленного вывода пучка протонов из синхрофазотрона ОИЯИ. Рассматриваются схемы вывода с одним и двумя сверхпроводящими магнитами, с отклонением протонного пучка на разные углы. Предлагаются различные принципы охлаждения жидким гелием обмоток сверхпроводящих септум-магнитов: в криостатах различной конструкции или с помощью циркулирующего по трубкам жидкого гелия. С практической точки зрения, особого внимания заслуживают септум-магниты из сверхпроводников с внутренней стабилизацией.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
I. Введение	I
II. Схема вывода с двумя магнитами	4
III. Схема вывода с одним магнитом при $\beta \approx 0,02$ рад.	9
IV. Расчёт схемы вывода с одним сверхпроводящим магнитом при $\beta = 0,12$ рад.	11
А. Исходные данные	12
Б. Конструкция криостата	12
В. Обмотка	13
Г. Охлаждение СВМ до температуры жидкого азота	16
Д. Ориентировочный подсчёт теплопритоков к обмотке СВМ. Расход жидкого гелия при работе СВМ.	19
Е. Электроснабжение, контроль и безопасность	25
У. Перспективы в создании сверхпроводящих септум-магнитов	27
У I. Выводы	31
У II. Приложение	33

В в е д е н и е

В настоящей работе рассмотрены магниты с септумом, осуществляющие отклонение и фокусировку протонного пучка с энергиями до 10 Гэв при медленном выводе его из синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Медленный вывод обеспечивает обширные исследования, использующие электронную методику, растянутыми во времени пучками заряженных частиц.

Одной из важнейших характеристик систем вывода является их эффективность, т.е. доля ускоренного пучка, выведенного за пределы камеры ускорителя. Кроме очевидных преимуществ высокой эффективности вывода для физических экспериментов, малая часть пучка, потерянная в ускорителе, позволяет предохранить вакуумную камеру и узлы установки от сильной радиоактивности, которая вырастает в серьезную проблему при высокой интенсивности ускоренного пучка.

Элементом, от которого зависит эффективность систем медленного вывода пучка из ускорителей на высокие энергии, является так называемый септум-магнит ^{1 ÷ 3}. Этот магнит имеет С-образную форму, на краю его зазора расположен тонкий проводник с током ("Септум"), отделяющий внутреннюю часть зазора с рабочим полем от наружной области, где поле должно иметь весьма малую величину. Такой элемент служит для отделения циркулирующего пучка от выводимого. Часть ускоренного пучка, попавшая на септум, безвозвратно теряется.

Эффективность вывода может быть оценена следующей зависимостью:

$$E_f \approx 1 - \frac{e^2 S}{B},$$

где: S - толщина септума; B - глубина заброса пучка в зазор выводного устройства, определяемая способом вывода и параметрами ускорителя; коэффициент "2" учитывает спад интенсивности частиц по зазору, который носит приблизительно линейный характер.

В свою очередь минимальная толщина "тёплого" септума" определяется соотношением:

$$S_{min} = \frac{(BR) \beta}{\mu_0 \cdot l \cdot j_{max}} \cdot \tau$$

Здесь: (BR) - жёсткость эжектируемых частиц; β - угол их отклонения в септум-магните; l - длина септум-магнита; j_{max} - максимальная допустимая плотность тока в септуме; фактор $\tau \approx \sqrt{t_u/t_c}$ (где t_u - длительность импульса тока, t_c - длительность цикла ускорения) учитывает направление септума, работающего в импульсном режиме; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$.

Казалось бы, увеличением длины магнита l можно обеспечить достаточное уменьшение S . Однако, во-первых, длина прямолинейных участков вакуумных камер ускорителей, где могут быть размещены выводные элементы, ограничена. Во-вторых, конечный угловой разброс пучка, попадающего в зазор, приводит к потерям частиц на плоскостях проводника, т.е. в формуле для E_p , приведённой выше, в этом случае под S следует подразумевать эффективную толщину, которая растёт с увеличением l .

Таким образом, при конструировании септум-магнитов, обеспечивающих высокую эффективность вывода, следует стремиться прежде всего к уменьшению толщины септума при реально допустимых и даже небольших длинах магнита.

В настоящей работе сделана попытка оценить возможности применения сверхпроводников для септумов и сравнить полученные результаты со случаем его "тёплого" исполнения. Эти оценки выполнены

применительно к системе медленного резонансного вывода протонного пучка из синхрофазотрона ОИЯИ, как для одномагнитной схемы, когда отклонение пучка за пределы камеры ускорителя осуществляется с помощью одного септум-магнита, так и для двухмагнитной, в которой отклонение пучка осуществляется в два этапа, чем обеспечивается уменьшение толщины септума первого магнита. При двухмагнитной схеме вывода первый (по ходу пучка) магнит осуществляет лишь незначительное отклонение пучка, достаточное для "заброса" протонов во второй магнит, минуя толщину септума, которая в этом случае может иметь достаточную величину.

Расчёты (см. Приложение) показали, что при пересечении пучком септума выделяемая в последнем энергия нарушает его сверхпроводимость. Поэтому изложение материала дано в предположении, что используется предварительное отклонение пучка на малый угол, например, с помощью электростатического септума.

Сравнение параметров выводных магнитов (ВМ) обычного типа с соответствующими вариантами сверхпроводящих магнитов (СВМ) сделано для следующих случаев (только для медленного вывода):

- 1) формагнит в схеме вывода с двумя магнитами;
- 2) магнит разной длины (в схеме вывода с одним магнитом).

При разработке выводных систем одна из основных трудностей состоит в получении предельно тонкого септума. Достигнутые в настоящее время рекордные средние плотности тока в "тёплых" септумах с принудительным охлаждением составляют около 70 а/мм^2 .

Применение в этих целях сверхпроводников, допускающих повышение плотности тока в несколько раз, позволило бы значительно уменьшить толщину септумов. Последнее решение привлекательно и по другим причинам:

1) сверхпроводящая обмотка не выделяет тепла, и энергия расходуется только на компенсацию внешнего теплопритока к жидкому гелию;

2) обмотку магнита можно питать весьма небольшим постоянным током (при большом числе витков обмотки);

3) доля толщины септума, определяемая пондеромоторными напряжениями, может быть существенно уменьшена, так как прочность материалов значительно увеличивается с понижением температуры.

II. СХЕМА ВЫВОДА С ДВУМЯ МАГНИТАМИ.

Рассмотрим формагнит со следующими основными параметрами:

поле в рабочем объеме	0,1 тл;
длина магнита	4 м;
угол отклонения протонного пучка	- $\beta \approx 0,01$ рад;
толщина септума	2 мм;
высота септума	46 мм.

Ниже приводятся расчёты минимально возможных толщин септумов при различных конструкциях криостата СВМ.

ВАРИАНТ I. ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ГЕЛИЕВЫЙ КРИОСТАТ С ЭКРАНОМ, ЗАКОНТАКТИРОВАННЫМ НА МАГНИТОПРОВОД С АЗОТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ (РИС. I).

По условию допустимых напряжений при изгибе толщина стенки криостата $\delta_{кр}$ находится по /4, стр. 246 /:

- максимальный изгибающий момент в середине высоты стенки криостата

$$M_{изг} = \beta_2 \cdot q \cdot a^2, \quad (I)$$

где: $\beta_2 = 0,133$; $q^{нар} = q_m + q_{ат} = \rho_m \cdot a + 1 \cdot a$ - давление на наружную стенку криостата, кг/см; q_m - магнитное давление на единицу длины наружной стенки криостата в области септума, кг/см; $q_{ат}$ - давление на единицу длины стенок от атмосферного давления, кг/см; a - высота септума, см.

$$q^{нар} = (\rho_m + 1) \cdot a = \left(\frac{100 \text{ Н}^2}{8\pi} + 1 \right) \cdot a = \left(\frac{0,1^2 \cdot 100}{8 \cdot 3,14} + 1 \right) \cdot 4,6 = 4,79 \frac{\text{кг}}{\text{см}} \quad (2)$$

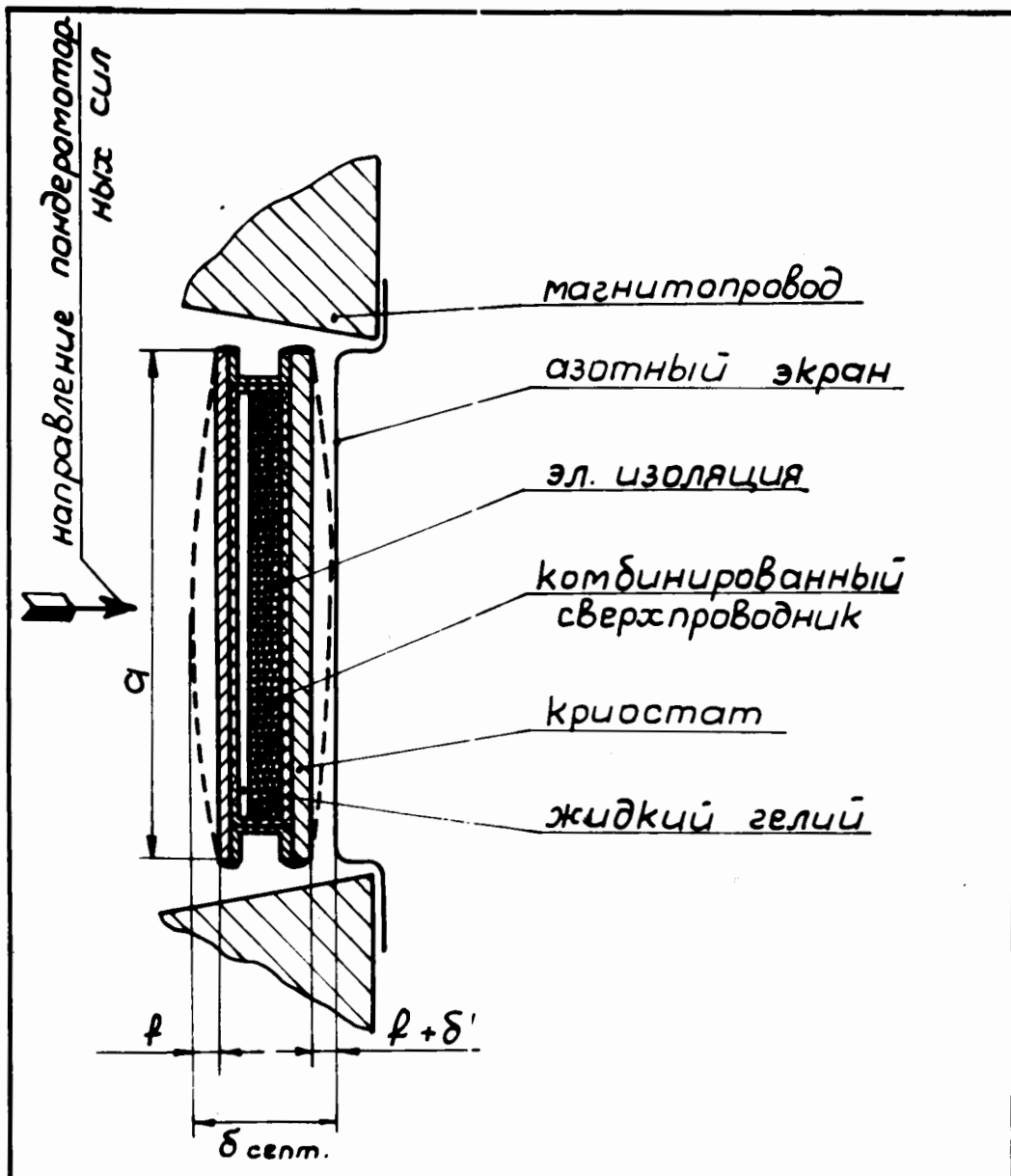


рис. 1

Исполнение сверхпроводящего выводного магнита при одномангитной схеме вывода. Криостат с прямоугольными стенками (вариант 1)

Здесь: H - напряженность магнитного поля в центре магнита, тл;
 P_m - эквивалентное магнитное давление на стенки соленоида, кг/см².

Соответственно, $q^{внут.}$ на внутреннюю стенку составит 4,6 кг/см.

Однако, ввиду малости магнитного давления q_m , примем

$q^{нар.} = q^{внут.} = q = 4,79$ кг/см. Напряжения при изгибе:

$$\sigma_{изг.} = \frac{M_{изг.}}{W_{изг.}} = \frac{\beta_2 \cdot q \cdot a^2}{\frac{\delta_{кр.}^2 \cdot a}{6}} \quad (3)$$

откуда, приняв для стали IX18H9T при 4°K $[\sigma]_{доп.} = 5000$ кг/см²:

$$\delta_{кр.} = \sqrt{\frac{6\beta_2 q a}{[\sigma]_{доп.}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 0,133 \cdot 4,79 \cdot 4,6}{5000}} \approx 0,06 \text{ (см)}$$

Таким образом, необходимо принять $\delta_{кр.} \geq 0,6$ мм.

При $\delta_{кр.} = 0,6$ мм прогиб наружной стенки криостата составил бы, согласно /4, стр. 143, 137, 16/:

$$f = 0,013 \cdot \frac{q a^4}{D} = 0,013 \cdot \frac{4,79 \cdot 4,6^4}{40} \approx 0,7 \text{ (см)}, \quad (4)$$

что недопустимо;

здесь D - жёсткость плоской пластинки при изгибе:

$$D = \frac{E \cdot \delta_{кр.}^3}{12(1-\mu^2)} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 0,06^3}{12(1-0,3^2)} \approx 40 \text{ (кгсм)} \quad (5)$$

E - модуль упругости, кг/см²;

μ - коэффициент Пуассона.

Поэтому по условию допустимого прогиба принимаем толщину стенок криостата $\delta_{кр.} = 1,2$ мм (прогиб наружной стенки $f = 0,9$ мм; $\sigma_{изг.} \approx 1.300$ кг/см²).

Общая толщина септума по варианту I (рис. I).

$$\delta_{\text{септ.}} = \delta_{\text{кр.}}^{\text{внутр.}} + \delta_{\text{кр.}}^{\text{нар.}} + \delta_{\text{аз.э.}} + \delta_{\text{сп}}' + \delta_{\text{м}}' + \delta_{\text{зел}}' + \delta + 2f \quad (6)$$

Здесь принято: $\delta_{\text{кр.}}^{\text{нар.}} = \delta_{\text{кр.}}^{\text{внутр.}}$

$\delta_{\text{аз.э.}} = 0,1 \text{ мм}$ - толщина азотного экрана из меди;

$\delta_{\text{зел}}' = 0,5 \text{ мм}$ - приведенная толщина проходов для жидкого гелия, электрической изоляции обмотки сверхпроводящего соленоида (СПС), перемычек внутри криостата;

$\delta = 0,3 \text{ мм}$ - зазор между криостатом и азотным экраном.

Величину $\delta_{\text{сп}}$ найдем по необходимому для создания в зазоре индукции $0,1 \text{ тл}$ числу ампер-витков обмотки СПС.

Индукция поля в зазоре магнита с железом /5, стр. 349/

$$B_0 = \frac{0,4\pi N\mathcal{J}}{a} \cdot 10^{-4} \text{ [тл]}, \quad (7)$$

где: $N\mathcal{J}$ - число ампер-витков обмотки.

Отсюда
$$N\mathcal{J} = \frac{0,1 \cdot 10^4 \cdot 4,6}{0,4 \cdot 3,14} = 3.600 \text{ (ампер-витков)}$$

Сечение сверхпроводника по допустимой в нём плотности тока

$j_{\text{дон.}}$:

$$S_{\text{сп}} = \frac{N\mathcal{J}}{j_{\text{дон.}}} \text{ (см}^2\text{)}.$$

При $H = 0,1 \text{ тл}$ можно принять /6, стр. 29/ для коротких образцов из:

$$\text{Nb}_3\text{Sn} - j_{\text{дон.}} = 10^6 \text{ а/см}^2;$$

$$48 \text{ NbTi} - j_{\text{дон.}} = 2 \cdot 10^5 \text{ а/см}^2;$$

$$\text{Nb} - 25 \text{ Zr} - j_{\text{дон.}} = 10^5 \text{ а/см}^2;$$

По данным, полученным в криогенном отделе ЛВЭ, для отечественной проволоки НЦ-50 (Nb-50% Zr) - $j_{гон.} = 5 \cdot 10^5$ а/см².

По другим данным для проволоки Nb-75Zr в низких полях $j_{гон.} \geq 7 \cdot 10^4$ а/см² (по сверхпроводнику).

В целях снижения деградации* и увеличения стабильности работы в данной конструкции СВМ применяется стабилизация сверхпроводника нормальным металлом. В данном случае целесообразной степенью стабилизации можно считать соотношение сечений сверхпроводника и меди 1:5. Исходя из этого:

$$S_{сн}^{макс.} = \frac{3600}{7 \cdot 10^4} (см^2) \approx 0,05 см^2$$

$$S_{сн}^{мин.} = \frac{3600}{10^6} \approx 0,004 см^2$$

Примем $S_{сн} = 0,02 см^2$, следовательно,

$$\delta'_{сн} = \frac{S_{сн}}{a} = \frac{0,02}{4,6} \approx 0,005 (см),$$

$$\delta'_m = 5 \delta'_{сн} = 0,025 (см)$$

Следовательно, согласно (6), толщина септума СВМ по варианту I:

$$\delta_{септ.} = 1,2 + 1,2 + 0,1 + 0,05 + 0,25 + 0,5 + 0,3 + 1,8 = 5,4 (мм)$$

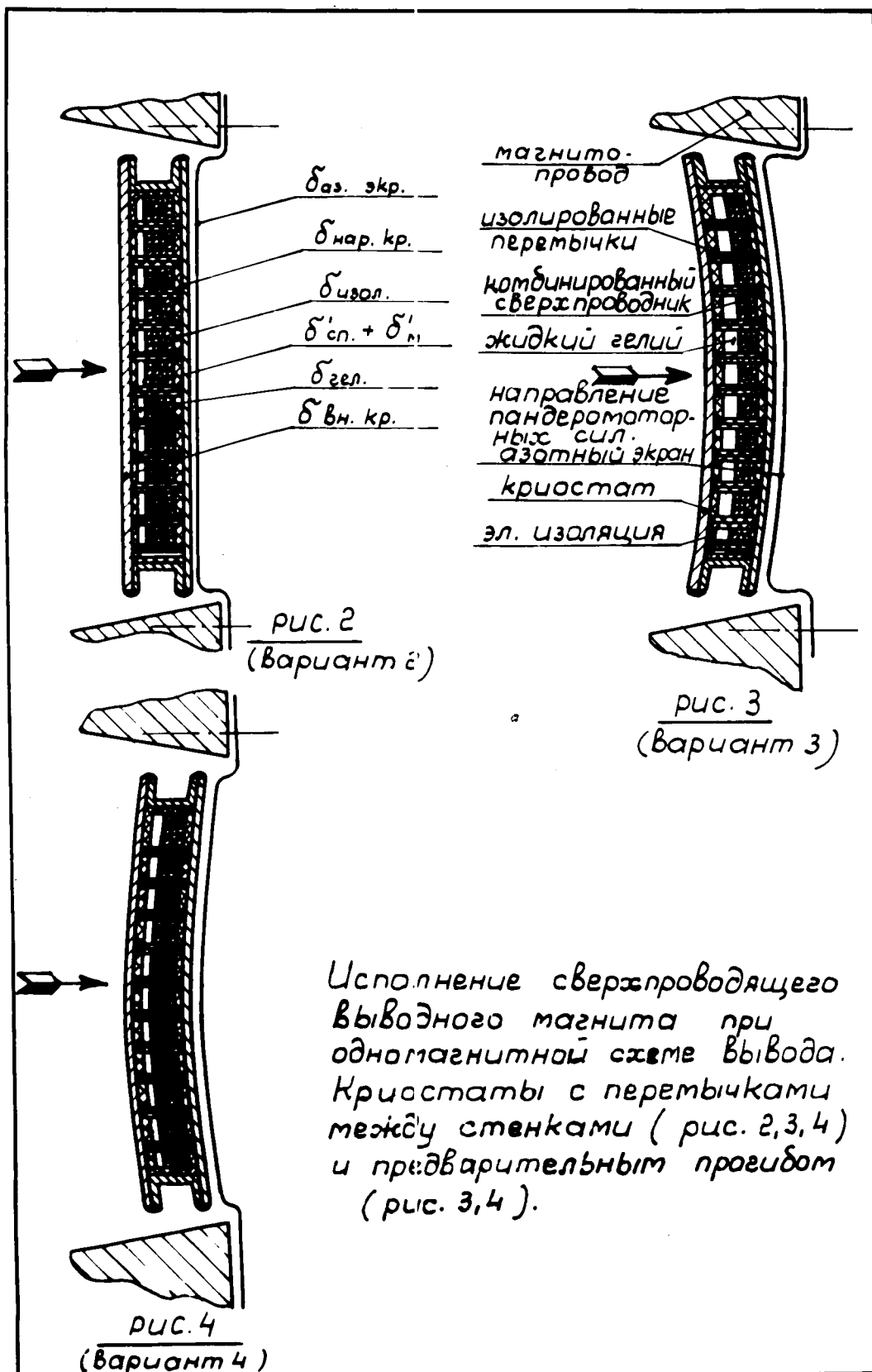
При других конструкциях криостата (рис. 2, 3, 4) толщина септума может быть значительно меньшей. Эти конструкции имеют соответственно прямую, выпуклую и вогнутую формы сечения криостатов и азотный экран, причем, стенки криостатов облегчены и за счёт предварительного прогиба стенок (рис. 3 и 4), и за счёт перемычек, скрепляющих стенки между собой и работающих на растяжение.

Толщина предварительно прогнутой стенок криостата находится приближенно из:

$$[\delta]_{гон} = \frac{\rho \cdot R}{\delta_{кр}^{внутр}}$$

(8)

* Снижение критического тока в обмотке СВМ по сравнению с короткими образцами.



где: ρ - удельное давление на стенку, кг/см²;

R - радиус предварительного изгиба стенки, см.

Можно принять прогиб ~ 2 мм, что соответствует $R = 7,5$ см. Ввиду малости магнитного давления примем $\rho \simeq 1$ кг/см². Отсюда

$$\delta_{кр} \geq \frac{\rho D}{2 [G]_{дон}} = \frac{1 \cdot 15}{2 \cdot 5000} = 0,0015 \text{ (см)}$$

Из конструктивных соображений принято $\delta_{кр}^{внутр.} = 0,2$ мм.

Выполнение криостатов с перемычками гораздо сложнее, чем по варианту I, оно требует специальной проработки и расчётов. Такая проработка здесь не делается, а толщины септумов можно принять равными по всем трём вариантам:

$$\begin{aligned} \delta_{септ} &= 2\delta_{кр} + \delta_{аз.э} + \delta'_{сн} + \delta'_m + \delta'_{зел} + \delta = \\ &= 2 \cdot 0,2 + 0,1 + 0,05 + 0,25 + 0,5 + 0,2 = 1,5 \text{ (мм)} \end{aligned}$$

Следует отметить, что варианты 3 и 4 (рис.3 и 4) особо выгодны в СВМ, индукция которых велика, и магнитное давление, передающееся на наружную стенку, достигает больших значений.

В таблице № I приведены толщины септумов формагнитов в "теплом" и сверхпроводящем исполнении для схемы вывода с двумя магнитами.

Таблица № I

СХЕМА ВЫВОДА С ДВУМЯ МАГНИТАМИ "ТЕПЛОЕ" И СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ
ИСПОЛНЕНИЕ ФОРМАГНИТА.

Исполнение формагнита	"Теплый" магнит	СВМ в криостате с прямоугольными стенками (вар. I, рис. I)	СВМ в криостатах по вариантам 2, 3, 4 (рис. 2, 3, 4)
Толщина септума, мм	2	5,4	1,5

Отсюда следует, что сверхпроводящий формагнит с септумом "криостатного" типа нецелесообразен.

III. СХЕМА ВЫВОДА С ОДНИМ МАГНИТОМ ПРИ $\beta \approx 0,02$ РАД.

Преимущества СВМ по сравнению с ВМ проявляются в схеме вывода пучка с одним магнитом, особенно при больших значениях индукции магнитного поля в зазоре.

Рассмотрим магнит со следующими основными параметрами:

угол отклонения протонного пучка - $\beta \approx 0,02$ рад;

жёсткость частицы (BR) - 35,3 тл х м;

средняя плотность тока в обмотке

"теплого" магнита $j_{cp} = 10$ а/мм² х);

скважность импульсов питающего тока

"теплого" магнита $\tau = 1:10^6$

A. "ТЕПЛЫЙ" МАГНИТ

При длине магнита $l = 1$ м:

магнитное поле в зазоре B_0 по условию

$$\beta = \frac{B_0 l}{BR} \approx 0,02 \text{ (рад)} \quad (9)$$

составит:

$$B_0 = \beta \frac{BR}{l} = 0,02 \cdot \frac{35,3}{1} = 0,706 \text{ (тл)},$$

здесь: BR - жёсткость частицы.

Удельную величину тока (j) обмотки ВМ на единицу высоты септума найдем из зависимости

х) $j_{cp} = 10$ а/мм² взята на основании опыта работы магнитов и линз на синхрофазотроне в циклическом режиме, подобно которому должен работать выводной магнит в теплом варианте.

$$B_0 \approx \frac{\mu_0 \mathcal{I}_0}{a}, \text{ приняв } a = 1; \dots \quad (10)$$

здесь: μ_0 - магнитная проницаемость вакуума;

\mathcal{I}_0 - ток в обмотке ВМ, в амперах;

a - высота воздушного зазора магнита (септума), м ;

$$\mathcal{I} = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,706}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 5,63 \cdot 10^5 \text{ а/м} = 5,63 \cdot 10^2 \text{ а/мм.}$$

Приняв для упрощения, что импульс тока во времени имеет прямоугольную форму при $t_{\text{имп.}} = 0,9$ сек и $t_{\text{цикл.}} = 9$ сек, получим для среднего значения тока на единицу высоты септума:

$$i_{\text{ср}} \approx \mathcal{I} \sqrt{\frac{t_{\text{имп.}}}{t_{\text{цикл.}}}} = 5,63 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{0,9}{9}} = 1,78 \cdot 10^2 \text{ а/мм} \quad (II)$$

Следовательно, толщина септума $\delta_{\text{септ}}$ в данном случае составит

$$\delta_{\text{септ}} = \frac{i_{\text{ср}}}{j_{\text{ср}}} = \frac{178}{10} \approx 18 \text{ (мм)}$$

С учётом электрической изоляции и отверстий в проводнике обмотки для водоохлаждения толщина септума ВМ при $\ell = 1\text{м}$ составит

$$\delta_{\text{септ}} \approx 25 \text{ мм}$$

Соответственно при $\ell = 2$ и 4 (м) значения B_0 , \mathcal{I} , $i_{\text{ср}}$ и $\delta_{\text{септ}}$ уменьшаются в 2 и 4 раза.

Б. СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ВЫВОДНОЙ МАГНИТ.

По аналогии с расчётами, приведенными в п.П, ниже в таблицу № 2 сведены результаты рассмотрения схем вывода с одним СВМ при различных его длинах. Высота септума в расчетах принята $a = 4,6$ см, а индукция в зазоре соответственно из условия

$$\beta = \frac{B_0 \ell}{BR} \approx 0,02 \text{ рад.}$$

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ СВМ В СХЕМАХ ВЫВОДА С ОДНИМ МАГНИТОМ ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ КРИОСТАТОВ И ДЛИНАХ МАГНИТОВ

Длина магнита, м	0,25	0,5	1	2	4	
Индукция поля в зазоре B_0 , тл	2,8	1,4	0,7	0,35	0,175	
Толщина стенок криостата по вар. I (рис. 2)	$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{кр}^{внутр} \\ \delta_{кр}^{нар.} \end{array} \right.$, мм	$\delta_{кр}^{внутр}$, мм	1,1	1,1	1,1	1,1
		$\delta_{кр}^{нар.}$, мм	3,5	2,2	1,6	1,4
Напряжение изгиба наружной стенки криостата $\sigma_{изг}$, кг/см ²	4000	3100	2000	1300	1100	
Плотность тока, а/см ²	$\left\{ \begin{array}{l} \text{по сечению} \\ \text{сверхпроводника} \\ \text{по полному сечению} \\ \text{септума (вар. 2, 3, 4)} \end{array} \right.$	по сечению сверхпроводника	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
		по полному сечению септума (вар. 2, 3, 4)	$2,5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$0,9 \cdot 10^4$
Число ампер-витков обмотки СВМ	102.000	51.000	25.500	12.750	6.375	
Общая толщина септума СВМ при прямоугольном криостате по вар. I						
$\delta_{септ}$, мм	15	10,5	8	7	6,5	
СВМ по вариантам 2, 3, 4 (рис. 2, 3, 4)	$\left\{ \begin{array}{l} \text{толщина стенок кри-} \\ \text{остата } \delta_{кр}, \text{ мм} \\ \text{общая толщина сеп-} \\ \text{тума } \delta_{септ}, \text{ мм} \end{array} \right.$	$\delta_{кр}$, мм	0,4	0,2	0,2	0,2
		$\delta_{септ}$, мм	9	5,5	3,5	3,0
Толщина септума соответствующего "теплого" БМ, мм	104	52	26	13	6,5	

Из таблицы № 2 следует:

для отклонения протонного пучка с жесткостью частиц $BR = 35,3$ тл.м. одним магнитом на угол $\beta \approx 0,02$ рад. целесообразно применить сверхпроводящий выводной магнит, если длина последнего должна быть менее 2 метров: уже при такой длине толщина септума снижается по сравнению с "теплым" магнитом в 2+4 раза (в зависимости от конструкции криостата СВМ). При длинах магнита свыше четырех метров это преимущество СВМ перестает быть значительным; однако следует отметить, что создание "теплого" магнита (по схеме вывода с одним магнитом) длиной 2м и более сопряжено со значительными техническими трудностями вследствие большого веса магнита и необходимости обеспечения его подвижности (например, с помощью гидропривода).

IV. РАСЧЁТ СХЕМЫ ВЫВОДА С ОДНИМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ МАГНИТОМ ПРИ $\beta = 0,12$ РАД ($\approx 7^\circ$).

В настоящее время в ЛВЭ проведены расчеты и ведутся работы по осуществлению схемы вывода с двумя "теплыми" магнитами. При этом основной магнит выполнен неподвижным и смещен относительно оси камеры синхрофазотрона, чтобы не препятствовать ускорению. Исполнение основного магнита неподвижным является вынужденным решением вследствие значительного веса последнего.

Замена громоздкой системы из двух "теплых" магнитов одним подвижным СВМ представляется перспективной. Ниже приведены расчёты некоторых конструктивных элементов такого СВМ, расхода криогенных жидкостей для его охлаждения и работы.

А. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА СВМ:

- угол отклонения протонного пучка $\theta = 0,12$ рад;
- жёсткость частицы пучка протонов $BR = 35,3$ тл.м.;
- высота септума магнита $\alpha = 60$ мм;
- длина магнита $l \leq 2$ м;
- требуемая эффективность вывода $\geq 90\%$;
- подвижность СВМ (при полном цикле 9 сек): в верхнем рабочем положении - 1 сек; в нижнем (в шлюзе при 78°K) - 8 сек.

Б. КОНСТРУКЦИЯ КРИСТАТА

Примем $l = 2$ м

Магнитное поле в зазоре, согласно (9):

$$B_0 = 0,12 \cdot \frac{35,3}{2} \simeq 2,1 \text{ (тл.)}$$

Геометрию магнитопровода примем согласно рис.5, конструкцию криостата - по рис.4.

Необходимое число ампервитков обмотки СВМ из (7):

$$N\gamma = \frac{2,1 \cdot 10^4 \cdot 6}{0,4 \cdot 3,14} \simeq 100.000$$

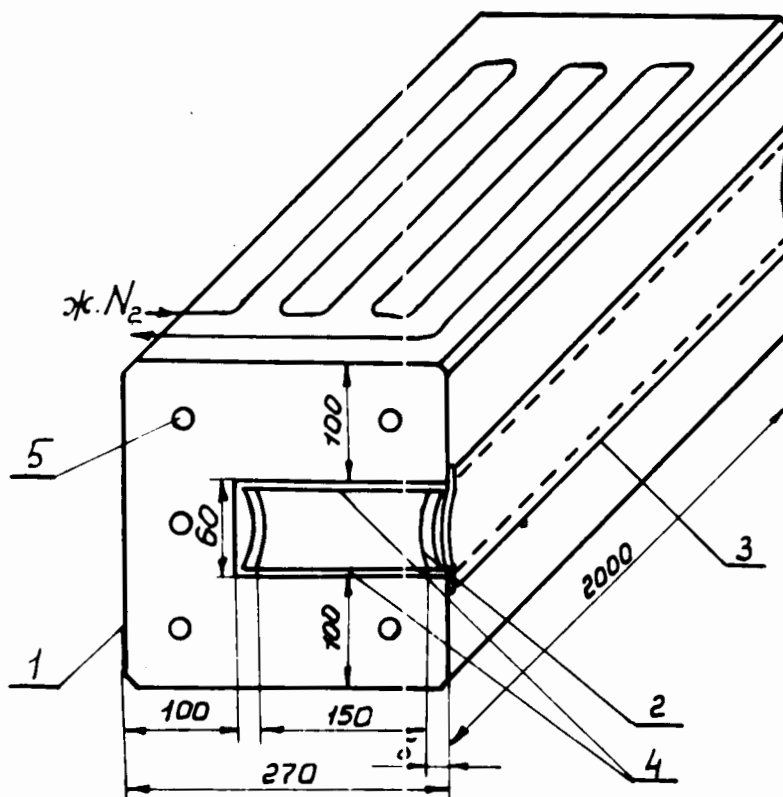
Радиальная составляющая пондеромоторных усилий

$$F = q^{\text{нар}} \cdot l = \left(\frac{100 \cdot 2,1^2}{8 \cdot 3,14} + 1 \right) \cdot 6 \cdot 200 = 21.100 \text{ (кг)},$$

где: $q^{\text{нар}}$ - согласно (2).

Эти усилия должны воспринимать тяги, скрепляющие противоположные стороны обмотки СВМ. Общее сечение этих тяг из не-

Рис. 5 Схематический чертеж СВМ для отклонения пучка протонов на угол $\beta = 0,12$ (одномагнитная схема вывода)



№ поз.	Наименование
1	Магнитопровод из холоднокатанной трансформаторной стали
2	Железный криостат со сверхпроводящей обмоткой
3	Азотный экран $\delta_{аз.э} = 0,1$ мм
4	Тяги
5	Каналы для азотного охлаждения

ржавеющей стали

$$S_T = \frac{F}{2[\sigma]_{дон}} = \frac{21 \cdot 100}{2 \cdot 2000} \approx 5,5 \text{ (см}^2\text{)}$$

Максимальную толщину стенок криостата найдем из (8):

$$\delta_{кр} = \frac{18,6 \cdot 5}{2000} = 0,046 \text{ (см),}$$

где
$$\rho^{нар} = \frac{H^2}{8J} + 1 \approx 18,6 \text{ (кг/см}^2\text{);}$$

R - радиус предварительного прогиба стенок криостата, соответствующий прогибу в середине высоты септума ≈ 5 мм.

Принимаем толщину стенок криостата $\delta_{кр} = 0,5$ мм.

В. ОБМОТКА СВМ

Обмотку СВМ можно выполнить, например, из проволоки № 520 (сплав Nb-75% Zr) . Сверхпроводящий kern такой проволоки протянут совместно с медной трубкой. Для этой проволоки:

- диаметр сверхпроводящего жерна .. 0,33 мм (сечение $8,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$);
- диаметр в медном покрытии .. 0,47 мм ($17,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$);
- диаметр в лаковой изоляции .. 0,6 мм ($28 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$);
- j_c по сверхпроводнику - $9,5 \cdot 10^4$ а/см² (в $H = 2$ тл);
- допустимый рабочий ток на одну проволочку (в $H = 2$ тл) - 80а.

Приняв обмотку СВМ из кабеля в четыре параллельных проволочки, считаем рабочий ток обмотки $I_{раб} \leq 320$ ампер. Примем $I_{раб} = 300$ а. При этом число витков обмотки

$$N = \frac{N \cdot I}{I_{раб}} = \frac{100 \ 000}{300} \approx 330$$

Площадь сечения проволочной обмотки СВМ с учётом коэффициента заполнения $K_z = 0,7$

$$S_{сн} = \frac{28 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 330}{0,7} \approx 5,3 \text{ (см}^2\text{)}$$

Следовательно, доля толщины септума СВМ за счёт проволочной обмотки составила бы (при соотношении сечений меди и сверхпроводника 2:1).

$$\delta'_{сн} + \delta'_m = \frac{S_{сн}}{a} = \frac{5,3}{6} = 0,88 \text{ (см)}$$

Общая толщина септума с проволочным СВМ могла бы составить, согласно (6):

$$\delta_{септм} = 0,5 + 0,5 + 0,1 + 8,8 + 0,5 + 0,2 + 0 = 10,6 \text{ (мм)}.$$

Может быть применена и другая проволока, например, НЦ-50, 65БТ, 60Т.

Уменьшить толщину септума можно, выполнив обмотку СВМ из ленточного сверхпроводника, например, $Nb_3 Sn$, стабилизированного медью. Из каталогов различных **западных** фирм известны данные для таких лент, выполненных по различным технологиям (таблица № 3).

При выполнении обмотки СВМ из ленты типа R-60384, например, толщина септума по (6) составит $\sim 3,5$ мм. Здесь $(\delta'_{сн} + \delta'_m)$ подсчитано, исходя из следующих данных: сечение ленты с учётом лакового покрытия с обеих сторон $(6,35 \times 0,19) \text{ мм}^2$; стабилизация серебром 4:1; критический ток в поле 2 тл - 1.800а.

Принимаем: рабочий ток $I_{раб} = 1.600 \text{ а}$;

Число слоёв обмотки СВМ по высоте $n_{сн} = 8$; число витков в каждом слое $n_B = 8$, что получено из:

$$n_{сн} \cdot n_B = \frac{N \gamma}{I_{раб}} = \frac{100 \ 000}{1600} \approx 63$$

Таблица №3

Данные из каталогов различных западных фирм для некоторых типов сверхпроводящих лент из Nb₃Sn

Фирма и тип ленты	Размеры полного сечения без изоляции	Критический ток одной ленты в поле 100 кэс/а	Критическая мощность тока в поле 100 кэс, отнесенная к полному сечению ленты (а/см ²)	Критический ток в поле 100 кэс, на каждый 1 мм ширины ленты (а)	Примечание
RCA (США) SR - 2100	2,3 x 0,110	65	2,6 · 10 ⁴	28	Ис в других полях - см. рис б; данные 1969
RCA (США) SR - 2104	2,3 x 0,152	190	5,4 · 10 ⁴	82	
RCA - (США) R - 60384	6,35 x 0,168	600	5,6 · 10 ⁴	94,4	
Westinghouse	3,1 x 0,05	31 (при 50 кэс·80)	2 · 10 ⁴	10 (при 50 кэс·26)	данные 1968г.
General Electric (США) 22CU015	12,5 x 0,081	150 (при 50 кэс·300, при 25 кэс·550)	1,45 · 10 ⁴	12 (при 50 кэс·24)	данные 1966 г.
CSF (Франция)	10 x 0,03	100 (при 50 кэс·200)	3,0 · 10 ⁴	10 (при 50 кэс·20)	данные нанесены электротехн. спос.

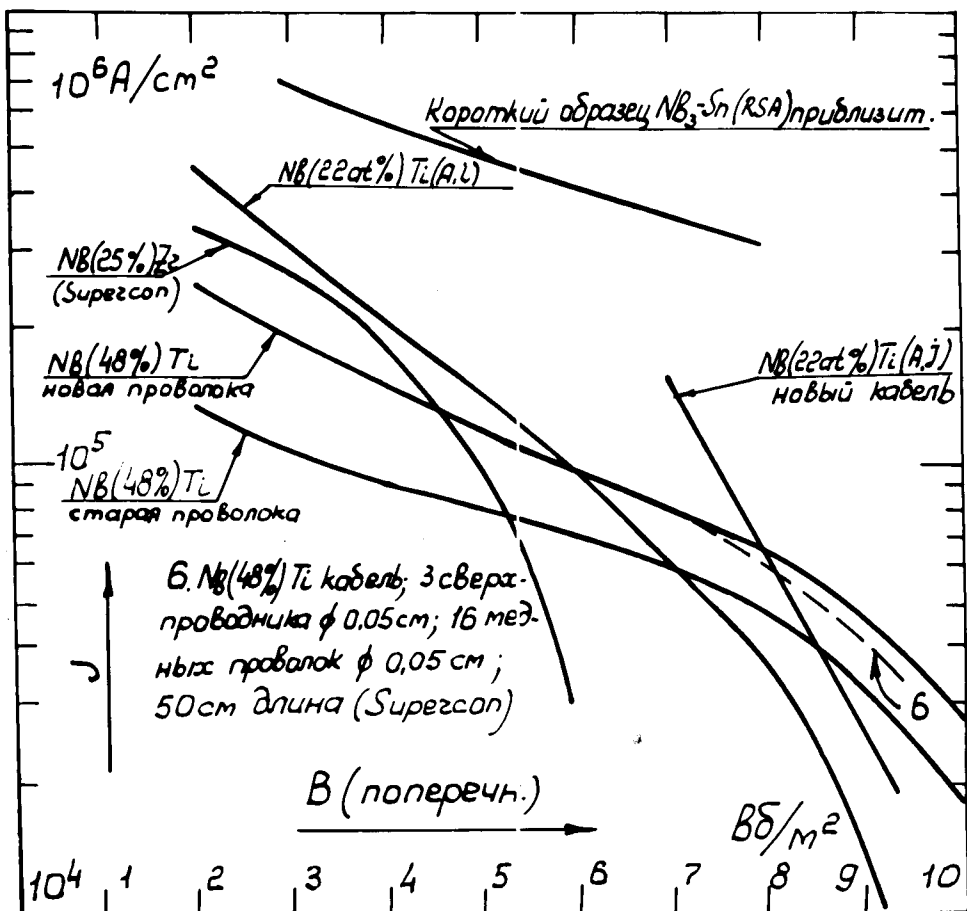


Рис. 7 B-J характеристики различных жестких сверхпроводников

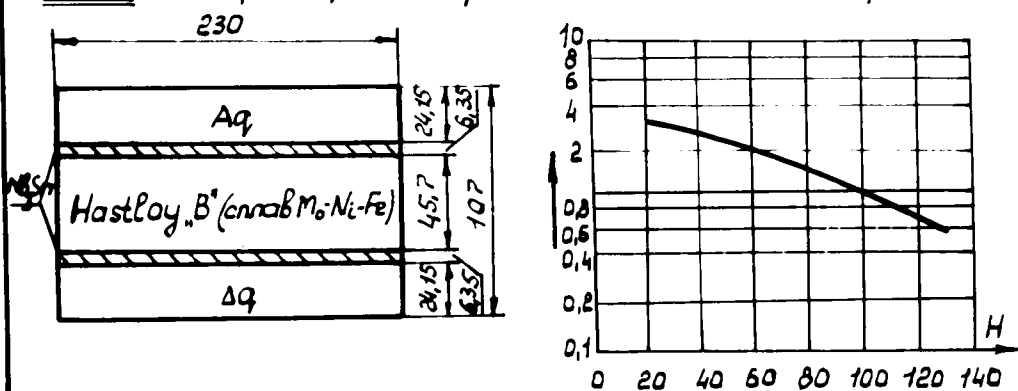


Рис. 6 Размеры (в микронах) и критический ток в различных внешних магнитных полях ленты типа SR-2100 производства фирмы RSA (США)

При плотной намотке витков $\delta'_{сн} + \delta'_m = 1,7$ (мм).

Однако, выбор $I_{раб} = 1,600$ а в данном случае не удобен, т.к. для такого СВМ требуются мощные токовводы / 8 / в криостат, дающие большой теплоприток в жидкий гелий.

Поэтому для дальнейшего рассмотрения выбираем СВМ с обмоткой из ленты типа SR - 2100 (см. таблицу № 3). Параметры такой обмотки:

- критический ток в поле 2 тл - $j_c = 200$ а;

- рабочий ток обмотки СВМ - $I_{раб} = 180$ а

- $n_{сн} \cdot n_{в} = 560$ (витков); $n_{сн} = 20$.

- $\delta'_{сн} + \delta'_m = 5,4$ (мм); $\delta_{септ} = 7,2$ мм.

Необходимое количество ленты типа SR - 2100:

- по длине: $L_{сн} = l_{в.ср} \cdot n_{сн} \cdot n_{в} = 4,5 \cdot 560 \approx 2.500$ (м),

где $l_{в.ср} \approx 4,5$ м (средняя длина витка по рис.5)

- по весу (включая стабилизирующее серебро):

$$P_{сн} = L_{сн} \cdot \gamma \cdot S = 2.500 \cdot 10^2 \cdot 10,5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} = 6.600$$
(г)

Принимаем $P_{сн} = 7$ кг.

Примем вес обмотки СВМ (с учётом веса криостата, азотного экрана и конструктивных элементов)

$$P_{обм} = P_{сн} + P_{кр} + P_{раз.э} + P_{конс.} = 7 + 25 + 0,2 + 2 = 35$$
 (кг)

Индуктивность обмотки СВМ по /5 , стр. 406 /:

$$L = \frac{4\pi N^2 S_{пот}}{a} \cdot \mu \cdot 10^{-9} [2H] = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 560^2 \cdot 3.300 \cdot 10^{-9}}{6} \approx 2,2$$
 гн (I2)

Здесь: $\mu = 1$;

$S_{пот}$ - площадь сцепления с обмоткой магнитного потока, [см²], по рис.5.

$$S_{пот} = (15 + 2\delta_{септ}) \cdot 200 \approx 3.300$$
 (см²)

Энергия, запасаемая в магнитном поле СВМ,

$$W_{эм} = \frac{L \cdot I_{раб.}^2}{2} [\text{дж}] = \frac{2,2 \cdot 180^2}{2} \approx 36000 \text{ дж} \quad (13)$$

Г. ОХЛАЖДЕНИЕ СВМ ДО АЗОТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Теплоёмкость всей массы СВМ в интервале температур

$$T_1 = 295^{\circ}\text{К} \quad \text{и} \quad T_2 = 78^{\circ}\text{К}$$

$$Q_{свм} = C \cdot P_{свм} \cdot (T_1 - T_2) [\text{ккал}] \quad (14)$$

где C - средняя удельная теплоёмкость материалов СВМ, принятая равной средней уд. теплоёмкости железа /9, стр. 128/;

$$C = 0,0859 \frac{\text{ккал}}{\text{кг.град}} ;$$

$$P_{свм} = P_{обм} + P_{магн} = 975 (\text{кг}) - \text{вес обмотки и магнитопровода};$$

$$P_{магн} = \gamma \cdot S_{магн} \cdot l = 7,8 (26 \cdot 27 - 6 \cdot 17) \cdot 200 \text{ по рис. 5.}$$

$$Q_{свм} = 0,0859 \cdot 975 \cdot (295 - 78) = 18.200 (\text{ккал}) \approx 76.000 \text{ кдж}$$

Для охлаждения такой массы СВМ требуется жидкого азота (с использованием только теплоты испарения при кипении):

$$M_{ж. аз.} = \frac{Q_{свм}}{\tau_{аз}} = \frac{18.200}{47,1} = 386 (\text{кг}) \approx 0,48 \text{ м}^3 = 480 \text{ л},$$

где: $\tau_{аз} = 47,1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ - теплота испарения азота /9, стр. 149/;
плотность жидкого азота при $77,4^{\circ}\text{К} = 804 \text{ кг/м}^3$ /9, стр. 149/.

Ниже приведен расчёт охлаждения СВМ теплоотдачей к жидкому азоту, протекающему либо в трубках, находящихся в хорошем тепловом контакте с поверхностью магнитопровода, либо в каналах внутри магнитопровода (рис.5).

Передаваемое жидкому азоту тепло (для плоской стенки) по /9, стр. 244/

$$Q_{\text{свм}} = K \cdot F \cdot \Delta T \cdot t \quad [\text{ккал}], \quad (15)$$

где: $K \approx 220 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ - коэффициент теплоотдачи при

кипении на наружной поверхности вертикальных трубок /9, стр.242/;

ΔT - температурный напор, [град];

Из (15) необходимая поверхность теплового контакта охлаждающих каналов (или трубок) с магнитопроводом приблизительно (приняв $\Delta T = \text{Const}$ и $t = 1$ час)

$$F = \frac{Q_{\text{свм}}}{K \cdot \Delta T \cdot t} = \frac{18.200}{220 \cdot 217} \approx 0,38 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Такая поверхность теплообмена может быть получена с помощью каналов диаметром $D_k = 10$ мм

$$n_k = \frac{F}{\pi D_k \cdot e} = \frac{3.800}{3,14 \cdot 1.200} \approx 6$$

Предполагается, что подвижный СВМ каждые 8 сек из 9-секундных циклов, находясь в нижнем положении, окружен стенками шлюза, расположенными в 25 см от поверхностей СВМ и имеющими температуру жидкого азота. На время захлаживания СВМ верхняя часть шлюза тоже может перекрываться крышкой, имеющей $t = 78^\circ\text{K}$.

Использование шлюза с холодными стенками позволит снизить

теплоприток к холодному магнитопроводу СВМ за 9-секундный цикл работы.

Ниже качественно показано, что предварительное захолаживание СВМ до азотной температуры теплоотдачей к жидкому азоту с помощью каналов необходимо, несмотря на наличие холодного шлюза, так как такое захолаживание за счёт только лучеиспускания к стенкам холодного шлюза длилось бы очень долго. Приводится расчет времени охлаждения магнитопровода СВМ на первые 50° (с 293°K до 243°K).

Теплоёмкость СВМ в указанном интервале температур

$$Q'_{\text{свм}} = C \cdot P_{\text{свм}} \cdot \Delta T_1 = 0,0859 \cdot 975 \cdot 50 = 4190 (\text{ккал}) = 17.600 \text{ кдж.}$$

Теплоприток лучеиспусканием через вакуум к стенкам холодного шлюза от охлаждающегося СВМ

$$Q'_{\text{свм}} = \epsilon_n \cdot C \cdot 10^{-8} (T_{\text{ср}}^4 - T_{\text{с13}}^4) \cdot F_{\text{свм}} \cdot t \text{ [дж]}, \quad (16)$$

где: ϵ_n - приведенная степень черноты поверхности СВМ, принятая неизменной и равной 0,6;

$C = 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 (\text{K})^4}$ - постоянная излучения для абсолютно чёрного тела / 9, стр. 220 /;

$T_{\text{ср}} = 268^{\circ}\text{K}$ - средняя на первом этапе охлаждения температура СВМ;

$F_{\text{свм}} \approx 22.500 \text{ см}^2$ - внешняя поверхность СВМ по рис.5;

t - время захолаживания, [сек]

Из (16): $t = \frac{17.600.000}{0,6 \cdot 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-8} \cdot 51,8 \cdot 10^8 \cdot 22.500} \text{ (сек)} \approx 12 \text{ час.}$

Это время будет несколько больше за счёт постоянного теплопритока

$Q''_{\text{свм}}$ к СВМ снизу по тепловым мостам в виде тяг гидропривода.

$$Q''_{\text{СВМ}} = \frac{\lambda_{\text{ср}} \cdot S_{\text{T}} \cdot \Delta T_1}{l_{\text{T}}} \quad [\text{Вт}] \quad (17)$$

здесь: $\lambda_{\text{ср}} = 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$ - средний коэффициент тепло-

проводности нержавеющей стали в диапазоне ΔT_1 /9, стр. II6/;

в качестве тяги гидропривода принято три трубы $\varnothing 60/5$ мм:

$$S_{\text{T}} = 27 \text{ см}^2 ; \quad l_{\text{T}} = 100 \text{ см.}$$

$$Q''_{\text{СВМ}} = \frac{0,16 \cdot 27 \cdot 50}{100} = 2,2 \text{ (Вт)}$$

С большим запасом, (считая, что $\Delta T_1 = 50^\circ\text{К}$ в течение всего первого этапа охлаждения), можно принять теплоприток по тягам гидропривода

$$Q''_{\text{СВМ}} \cdot t = 2,2 \cdot 12 \cdot 3.600 = 95.000 \text{ (дж)}$$

Этот дополнительный теплоприток увеличит время t всего на

$$\Delta t = 12 \text{ (час)} \cdot \frac{95.000 \text{ (дж)}}{17.600.000 \text{ (дж)}} \simeq 0,07 \text{ часа},$$

так что его можно не учитывать.

В дальнейшем, вследствие снижения температурного напора, процесс охлаждения пойдет ещё медленнее. Так, охлаждение на втором этапе, например, с 243°К до 143°К , будет длиться ~ 90 час. а на третьем (до 78°К) - ещё около 700 часов.

Д. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ ПОДСЧЁТ ТЕПЛОПРИТОКОВ К ОБМОТКЕ СВМ.

РАСХОД ЖИДКОГО ГЕЛИЯ ПРИ РАБОТЕ СВМ.

ВАРИАНТ I.

По этому варианту обмотка СВМ выполняется с многослойной изоляцией на разность температур 73°К и 4°К ; в передней части

септума расположен азотный экран из медной фольги. Силы инерции при движении СВМ и вес обмотки воспринимаются вертикальными тягами крепящими обмотку относительно магнитопровода и являющимися тепловыми мостами (от 78°K до 4°K). Отверстия для входа и выхода пучка из СВМ остаются открытыми; через них СВМ воспринимает лучистый теплоприток от внутренних поверхностей кольца ускорителя, имеющих температуру 300°K . Теплопритоком остаточными газами пренебрегаем: в камере ускорителя вакуум 10^{-5} мм.рт.ст.

а) Теплоприток от магнитопровода через многослойную изоляцию:

$$Q_1 = \frac{\lambda \cdot S_{\text{из}}}{\delta_{\text{из}}} \Delta T = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,32}{2 \cdot 10^{-3}} (78 - 4) \approx 5,9 \text{ (вт)}$$

здесь λ - коэффициент теплопроводности изоляции из стеклотолщиной 50 $\mu\text{к}$ и алюминированной лавсановой плёнки толщиной 12 $\mu\text{к}$ при вакууме в изоляционном пространстве 10^{-5} мм рт.ст. и удельном давлении на изоляцию 1.000 г/см²; по данным /10,рис.9/

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт}}{\text{м.град}} ;$$

$S_{\text{из}}$ - площадь поверхности многослойной изоляции по рис.5

$$S_{\text{из}} = 2 \cdot (10 + 60 + 10) \cdot 2000 = 320.000 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$\delta_{\text{из}}$ = 2 мм - толщина изоляции (для ориентировочных расчетов можно принять таким $\delta_{\text{из}}$, хотя в толщине септума это учтено цифрой только $\delta_{\text{из}} = 0,2$ мм).

Такой большой теплоприток ($Q_1 = 5,9$ вт) , можно снизить в 5 раз (по /10/), если удастся с помощью тяг полностью разгрузить изоляцию от давления.

Принимаем $Q_1 = 1,18$ Вт, что соответствует испарению жидкого гелия

$$h_1 = 1,42 \left[\frac{\text{л}}{\text{Вт} \cdot \text{час}} \right] \cdot 1,18 [\text{Вт}] \simeq 1,7 [\text{л/час}]$$

б) Теплоприток лучеиспусканием от материала внутренней поверхности кольца ускорителя через отверстия для входа и выхода пучка:

$$Q_2 = \epsilon_n \cdot c \cdot 10^{-8} (T_h^4 - T_c^4) F \simeq 1 \cdot 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-8} \cdot 3^4 \cdot 10^8 \cdot 180 = 8,47 (\text{Вт})$$

здесь: $\epsilon_n = 1$; T_h - температура теплых частей камеры ускорителя; T_c - температура септума

$F = 2 \cdot 6 \cdot 15 = 180$ (см²) - поверхность, воспринимающая тепло (по рис.5).

Этот чрезмерно большой теплоприток Q_2 необходимо снимать, введя азотное экранирование и многослойную изоляцию внутренних стенок криостата со стороны рабочего объема СВМ, например, с помощью медных азотных экранов толщиной 0,1 мм, законтактных на магнитопровод. Это приведёт к увеличению толщины септума на $(\delta + \delta_{\text{аз.э}}) = 0,3$ мм.

В дальнейшем принимаем $\delta_{\text{септ}} = 7,2 + 0,3 = 7,5$ (мм). Теперь можно считать $Q_2 = 0$. Зато необходимо учесть теплоприток через многослойную изоляцию от азотных экранов.

в) теплоприток от азотных экранов.

$$Q_3 = \frac{\lambda \cdot S_{\text{чз}}}{\delta_{\text{чз}}} \Delta T = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 580 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} (78 - 4) = 4,78 (\text{Вт})$$

При полностью разгруженной по давлению теплоизоляции можно принять $Q_3 \simeq 1$ Вт.

По испарению жидкого гелия: $h_3 = 1,4$ л/час

г) Теплоприток по тоководам в СВМ

Охлаждение тоководов парами испарившегося гелия трудно выполнимо в данном случае: подвод тока, жидкого гелия и азота возможен только снизу (внутри опор гидропривода ϕ 60/5 мм).

На стадии рабочего проектирования и конструирования СВМ потребуется разработка: 1) системы автоматической подливки гелия в СВМ: а) периодической, из подвижного или неподвижного гелиевого бачка, расположенного выше обмотки СВМ;

б) постоянной, через сифон специальной конструкции;

2) системы автоматического регулирования количества подаваемой в септум жидкости, обеспечивающей отсутствие газовых мешков в нём.

Указанные выше разработки позволят сконструировать и токовводы, охлаждаемые либо парами гелия (частично), либо азотом (промежуточное охлаждение), либо, наконец, неохлаждаемые.

Ориентировочно оценить теплопритоки для различного типа токовводом можно следующим образом:

1) для неохлаждаемых токовводов, согласно /11, стр. 109/ принимаем, что ток в I_a , текущий через пару токовводов оптимальной конструкции вызывает теплоприток в 84 мвт. Следовательно, при рабочем токе СВМ 180 ампер

$$Q_y = 0,084 \cdot 180 \approx 15 \text{ (вт)}$$

2) теплоприток по токовводам с промежуточным охлаждением жидким азотом, согласно /11, стр. 119/

$$Q_y = 1,25 \cdot 10^{-2} \left[\frac{b_m}{a} \right] \cdot 180 [a] \cdot 2 = 4,5 \text{ (вт)}$$

3) для охлаждаемых парами гелия токовыводов можно принять теплоприток $1,3+2$ Вт на каждые $1000\text{а} / 12, \text{стр. } 19; 13 /$; следовательно:

$$Q_4 = \frac{2}{1000} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{а}} \right] \cdot 180 [\text{а}] \cdot 2 = 0,72 [\text{Вт}],$$

что соответствует испарению жидкого гелия $h_4 \approx 1$ л/час.

д) теплоприток по тепловым мостам (от 78°К до 4°К) в виде вертикальных тяг, крепящих обмотку к магнитопроводу и воспринимающих силы инерции при движении СВМ и его вес:

Ориентировочно можно принять суммарное сечение вертикальных тяг

$$S_{\text{в.т.}} \geq \frac{F_{\text{в}}^{\text{макс}}}{[\sigma_{\text{дон}}]} = \frac{56}{1.500} \approx 0,04 (\text{см}^2)$$

здесь $F_{\text{в}}^{\text{макс}}$ - максимальные силы инерции обмотки при движении СВМ вверх, [кг];

$$[\sigma_{\text{дон}}] = 1.500 \text{ кг/см}^2 \text{ (тяги из нержавеющей стали)}$$

$$F_{\text{в}}^{\text{макс}} = P_{\text{обм}} + \frac{P_{\text{обм}}}{g} \cdot a = 35 + \frac{35}{9,8} \cdot 6 \approx 56 (\text{кг})$$

где: $P_{\text{обм}} = 35$ кг - вес обмотки и криостата

$a = 6 \text{ м/сек}^2$ - ускорение при подъёме СВМ в рабочее положение из шлюза.

Будем считать, что для крепления обмотки при движениях СВМ в обоих направлениях необходимо иметь 12 тяг сечением по 1 мм^2 , т.е.

$$S_{\text{в.т.}} = 0,12 \text{ см}^2.$$

Теплоприток по таким тепловым мостам

$$Q_5 = \frac{\lambda_{cp} \cdot S_{в.г} \Delta T}{l_m} = \frac{4,85 \cdot 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 74}{0,06} \approx 0,07 \text{ (вт)}$$

где: $\lambda_{cp} = 4,85 \frac{\text{вт}}{\text{м.град}}$ - средняя интегральная теплопровод-

ность неотожжённой нержавеющей стали в интервале $77+4^{\circ}\text{К}/9, \text{стр. II 8/}$;

$$l_m = 6 \text{ [см]} \quad \text{- длина тяг.}$$

е) суммарный теплоприток к обмотке СВМ по варианту I:

$$\sum Q_I = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 1,18 + 0 + 1 + 0,72 + 0,07 \approx 2,97 \text{ (вт)}$$

По расходу жидкого гелия это составит

$$L_{I \text{ в ар}} = 1,42 \cdot 2,97 \approx 4,2 \text{ (л/час).}$$

Этот теплоприток значителен.

ВАРИАНТ II

По этому варианту весь криостат выполняется с азотным экранированием и вакуумной изоляцией, т.е. отсутствует многослойная изоляция. Здесь Q_1 и Q_3 подсчитываются по (I6), как лучистые теплопритоки; $Q_2 = 0$; $Q_4 = 0,72$ вт и $Q_5 = 0,07$ вт (как в варианте I);

$$(Q_1 + Q_3) = \varepsilon_n \cdot c \cdot 10^{-8} \cdot (T_h^4 - T_c^4) \cdot F = 0,048 \cdot 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot 10^8 (28^4 - 4^4) \cdot 5.780 \approx \\ \approx 0,06 \text{ (вт)}$$

здесь: $F = 3.200 + 2.580 = 5.780 \text{ (см}^2\text{)}$

$\varepsilon_n = 0,048$ - для листовой нержавеющей стали.

Суммарный теплоприток по варианту П:

$$\sum Q_{\text{II}} = 0,06 + 0,72 + 0,07 = 0,85 \text{ (вт)},$$

что соответствует испарению жидкого гелия

$$L_{\text{II var}} = 1,42 \cdot 0,85 \approx 1,2 \text{ (л/час)}.$$

Е. ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ, КОНТРОЛЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ.

В качестве источника питания для СВМ может быть применен, например, селеновый выпрямитель типа ВУ-12/600; схема которого переделана, как указано в /14/. Может быть применен и любой другой низковольтный источник питания, например, на транзисторах.

Индуктивность СВМ значительна, она служит хорошим сглаживающим фильтром для пульсаций в кривой выпрямленного тока источника питания. Поэтому установки специальных сглаживающих фильтров не требуется, а двухполупериодная, трехфазная схема выпрямления может считаться вполне подходящей.

Существуют строгие требования к скорости подъема тока при запитке СВМ: слишком быстрая запитка может привести к преждевременному (по критическому току) переходу обмотки СВМ из сверхпроводящего состояния в нормальное. Обычно время подъема тока при запитке устанавливается экспериментально. Ориентировочно эту скорость для данного случая можно определить величиной 5 ± 10 а/мин.

При переходах обмотки СВМ в нормальное состояние запасенная магнитным полем энергия может выделиться внутри СВМ, на-

гревая обмотку и испаряя жидкий гелий. При большой запасенной энергии нагрев может вызвать порчу септума.

Для предотвращения выделения энергии $W_{эм}$ внутри СВМ параллельно обмотке подключается активное гасительное сопротивление $R_{гас}$. На него остаётся замкнутой обмотка СВМ после отключения источника питания по сигналу " датчика перехода", регистрирующего появление активной составляющей напряжения на концах обмотки.

Время t спада тока в обмотке СВМ при эвакуации энергии на $R_{гас}$ можно определить по закону изменения тока в контуре с индуктивностью:

$$i = \frac{U_n}{R_{гас}} \cdot e^{-t/\tau} \quad (18)$$

где: U_n - начальное напряжение на СВМ при подключении $R_{гас}$;
 τ - постоянная времени контура с $R_{гас}$ и L обмотки СВМ.
Более подробно о выборе параметров источников питания и схем эвакуации, о датчиках перехода см. В / 8, 12, 14, 15, 16 /.

У. ПЕРСПЕКТИВЫ В СОЗДАНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СЕПТУМ-МАГНИТОВ.

Рассмотренные выше варианты исполнения септум-магнитов из проволочного или ленточного сверхпроводника имеют два существенных недостатка: во-первых, сверхпроводник таких обмоток подвержен значительной деградации (в 3-5 раз снижается критический ток в обмотке по сравнению с коротким образцом той же проволоки); во-вторых, заметную долю толщины септумов составляют стенки криостатов, теплоизоляция.

Ниже приводятся некоторые перспективные направления в создании сверхпроводящих септум-магнитов, не имеющих указанных выше недостатков.

В настоящее время появились сверхпроводники с внутренней стабилизацией (с тонкими свитыми нитями) /17;18, стр.2080-2085/. В них почти полностью отсутствуют тепловыделения из-за скачков потока при увеличении тока. Поэтому такие обмотки не подвержены деградации. Плотности тока, получаемые в обмотках из внутренне стабилизированных сверхпроводников, на порядок выше, чем в обмотках с полной стабилизацией нормальным металлом. По данным фирмы ФРГ *Vakuumschmelze Siemens*, например, в кабеле, содержащем нити $\sim \phi 70 \mu\text{к}$ из сплава ниобий-титан в медной матрице (соотношение меди и сплава $\approx 2 : 1$ по объему), достигнуты плотности тока $\geq 10^5 \text{ а/см}^2$ при напряженности поля 60 кэ. В небольших соленоидах из такого сверхпроводника плотность тока по всему сечению обмотки достигает $6 \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$.

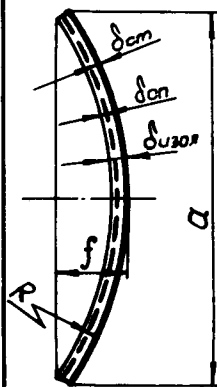
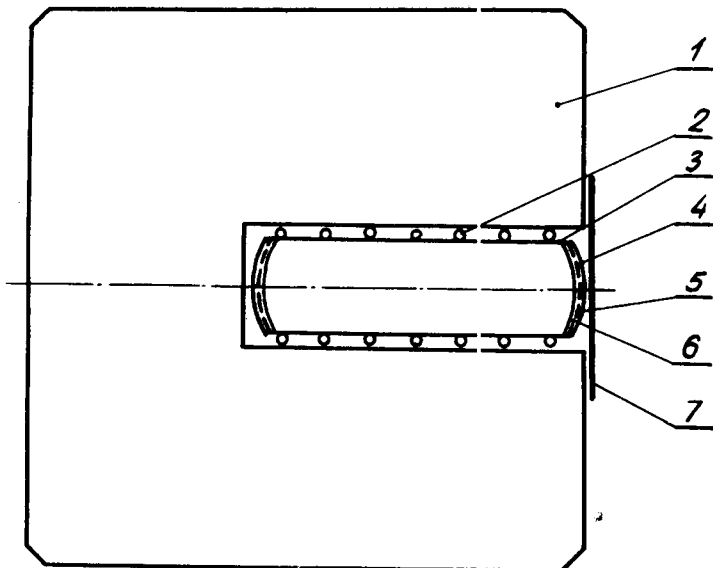
Кроме того, может быть предложен "бескриостатный" вариант септум-магнита (рис.8). Толщина септума магнита, выполненного по рис. 8, согласно приводимым ниже расчетам и результирующим кривым рис. 9, может составить всего 3 мм при индукции в зазоре 1,4 тесла.

Конструкция септума по рис. 8 предусматривает приклеивание эпоксидной смолой сверхпроводника к предварительно прогнутой металлической пластинке. Витки проводника электрически изолированы друг от друга и от пластины эпоксидом, но находятся в достаточно хорошем тепловом контакте с ней и далее с горизонтальными планками, на которые напаяны эмеевикис жидким гелием. Предварительный прогиб позволяет несущей пластине работать только на растяжение, что уменьшает её толщину по сравнению с плоской пластиной. Однако при малых напряженностях поля плоские пластины также могут быть применены.

Если теплоотвод от обмотки к гелию (по рис. 8) окажется недостаточным для поддержания обмотки в сверхпроводящем состоянии (особенно, если учесть тепловыделение в септуме при пересечении последнего выводимым пучком), то может быть предложен септум из трубчатого внутренне стабилизированного сверхпроводника, внутри которого прокачивается жидкий гелий. Септум в этом случае будет иметь большую толщину, но, в основном, за счёт жидкого гелия, плотность которого весьма мала. Пример применения такого трубчатого проводника для обмоток сверхпроводящих соленоидов описан в /16/.

Ниже проводится расчёт толщины септума магнита, выполненного по рис. 8.

Рис. 8. Бескристатный вариант
 септум-магнита с обмоткой из
 нитяного сверхпроводника.



1. Магнитопровод при 78°К.
2. Змеевик с жидким гелием.
3. Стягивающие планки.
4. Несущая пластинка.
5. Обмотка из сверхпроводника.
6. Электрическая изоляция из
эпоксиды.
7. Азотный экран.

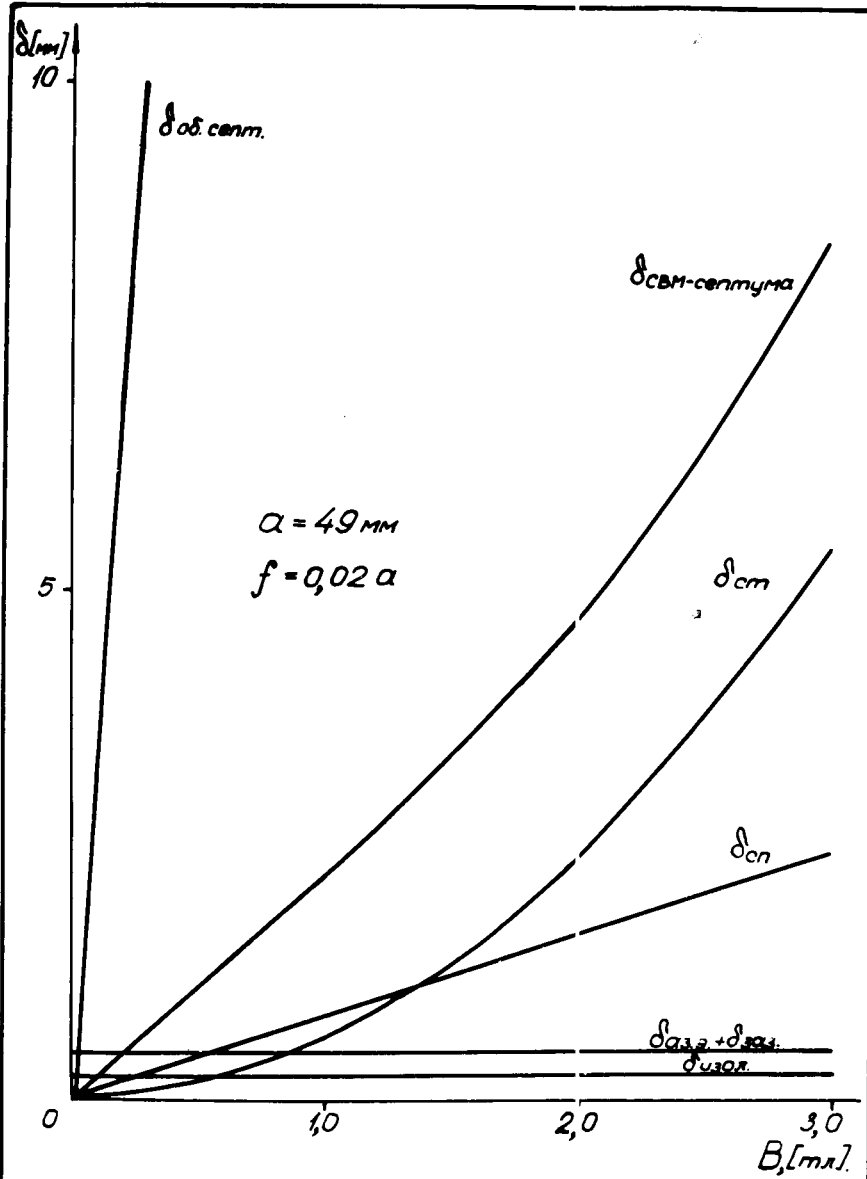


Рис. 9 Толщина септумов обычного и сверхпроводящего (по рис. 8) в зависимости от напряженности поля.

1. Толщина сверхпроводника - $\delta_{сп}$.

Индикация поля в зазоре магнита с железом по (7):

$$B_0 = \frac{0,4\pi Nj}{10^4 \cdot a} [\text{тл}],$$

где:

$$Nj = \alpha \cdot \delta_{сп} \cdot j;$$

здесь

j [$\text{а}/\text{см}^2$] — плотность тока в сверхпроводнике;

примем

$j = 10^5 \text{ а}/\text{см}^2$, независимо от напряженности поля.

Тогда:

$$\delta_{сп} = \frac{B_0 \cdot 10^4 \cdot a}{0,4\pi \cdot a \cdot j} \approx 0,08 B_0 [\text{см}].$$

2. Толщина опорной стенки - $\delta_{ст}$:

Для выгнутой стенки напряжение приблизительно можно найти по формуле, применяемой в расчётах цилиндрических сосудов:

$$\sigma = \frac{P_m \cdot R}{\delta_{ст}} [\text{кг}/\text{см}^2],$$

где σ — напряжение растяжения;

P_m — магнитное давление;

R — радиус прогиба стенки.

$$P_m = \frac{B_0^2}{8\pi} [\text{кг}/\text{см}^2], \text{ тогда}$$

$$\delta_{ст} = \frac{B_0^2 \cdot R}{8\pi \cdot \sigma} [\text{см}]$$

По рис. 8

$$R^2 - \frac{a^2}{4} - (R - f)^2 = 0.$$

Примем стрелу прогиба $f = 0,02 a$; тогда

$$R^2 - \frac{a^2}{4} - R^2 + 2R \cdot 0,02 a - (0,02 a)^2 = 0.$$

Пренебрегая последним членом, получим

$$R = 6,25 a.$$

$$\delta_{ст} = \frac{B_0^2 \cdot 6,25 \cdot a}{8 \pi \cdot b}$$

Примем для меди $\rho_{дон} = 2000 \text{ кг/см}^2$, тогда

$$\delta_{ст} = \frac{6,25 \cdot 4,9 \cdot B_0^2}{8 \cdot 3,14 \cdot 2000}$$

Если B_0 в [ТЛ], то $\delta_{ст} = 0,06 B_0^2$.

3. Общая толщина септума.

Толщину изоляции для всех случаев примем

$$\delta_{изол} = 0,02 \text{ см.}$$

Толщину азотного экрана и зазора между ним и стенкой примем

$$\delta_{аз.э.} + \delta_{зая.} = 0,02 + 0,02 = 0,04 \text{ (мм)}$$

Полная толщина сверхпроводящего септума по рис. 8

$$\delta_{септ} = \delta_{сп} + \delta_{ст} + \delta_{изол} + \delta_{аз.э.} + \delta_{зая.}$$

$$\delta_{септ} = 0,08 B_0 + 0,06 B_0^2 + 0,06 \text{ [см]}$$

Результаты расчёта представлены на рис. 9 рядом с кривой для обычного септума.

Наконец, также перспективным, хотя и менее изученным, является направление создания септум-магнитов, где используются диамагнитные свойства сверхпроводников.

Магнитный поток, созданный обмоткой (в том числе, и сверхпроводящей), расположенной не в области септума, проходит либо по

магнитопроводу (полностью или частично заключенному в сверхпроводящий экран), либо при отсутствии магнитопровода, направляется по необходимому пути с помощью этих экранов. Септум-магниты, выполненные таким образом, обладают существенным преимуществом перед рассмотренными выше вариантами: рассеянное поле перед септумом практически отсутствует, что повышает эффективность вывода пучка.

О принципах исполнения магнитных цепей с использованием диамагнитных свойств сверхпроводников говорится, например, в /19/.

VI. ВЫВОДЫ

1. Выполнение сверхпроводящего магнита (СВМ) с септумом для отклонения пучка протонов синхрофазотрона на углы до $\beta = 0,12$ рад при медленном выводе принципиально возможно. Для предотвращения недопустимого тепловыделения при пересечении септума пучком можно применить легкий ферромагнит, например, электростатический. Толщина септума такого магнита ($L = 3$ м; $\beta = 0,12$; $B_0 = 1,4$ тл) может составить не более 3 мм.

2. Время непрерывной работы СВМ от 100-литрового джара с жидким гелием составит не менее трех суток.

3. Выполнение криогенной технологической схемы для подвижного СВМ принципиально возможно. При дальнейшей работе в этом направлении необходима проработка следующих вопросов: исполнение гибких (или скользящих) гелиевых сифонов; регулирование подачи жидкого гелия в криостат; охлаждение тоководов; азотное охлаждение магнитопровода и шлюза и некоторых других.

4. В работе рассмотрен СВМ, осуществляющий только поворот пучка протонов; фокусировка последнего может быть получена, например, с помощью квадрупольной магнитной линзы, выполненной из внутренне стабилизированного сверхпроводника.

5. Особое внимание при развитии работ по выводу ускоренного пучка с помощью сверхпроводящих устройств следует уделить названным в главе У перспективным направлениям в создании септум-магнитов.

УП. ПРИЛОЖЕНИЕ.

Ниже приведен расчёт тепловыделения ΔE в септуме СВМ при пересечении его ускоренным до 10 ГэВ пучком интенсивностью 10^{12} протонов за 9-сек. цикл.

Примем ориентировочно:

1) удельную потерю энергии каждой частицей $\frac{dE}{dx} = 1,8 \text{ Мэв/г/см}^2$ здесь dx - единица длины столба вещества с удельным весом γ сечением 1 см^2 ;

2) ускоренные частицы теряют 1% своей интенсивности при пересечении каждого 1 мм толщины септума.

При этих допущениях для одного из рассчитанных вариантов СВМ (рис.8: $\beta = 0,12$; $B_0 = 1,4 \text{ тл}$, $a = 4,9 \text{ см}$; $\delta_{\text{септ.}} = 0,3 \text{ см}$; $L = 300 \text{ см}$) $\Delta E = \frac{dE}{dx} \cdot \gamma \cdot L \cdot N_{\text{пот}} = 1,8 \cdot 8 \cdot 300 \cdot 3 \cdot 10^{10} = 13 \cdot 10^{13} \text{ [Мэв]}$
 $= 13 \cdot 10^{13} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [дж]} \approx 21 \text{ дж.}$
 здесь: $N_{\text{пот}} = 0,03 \cdot 10^{12} = 3 \cdot 10^{10}$ - "потеряно" частиц в септуме толщиной 3 мм;

$\gamma = 8 \text{ г/см}^3$ - средний удельный вес материалов септума.

Энергия $\Delta E = 21 \text{ дж}$ выделяется в септуме каждые 9 секунд.

Приняв среднюю теплоемкость материалов септума, как для меди при 8°К , $c = 5 \cdot 10^{-4} \text{ дж/г.град.}$ / 9, стр. 122/, найдём прирост температуры ΔT септума, до пересечения пучком имевшего температуру $4,2^\circ\text{К}$:

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{c \cdot G} = \frac{21}{5 \cdot 10^{-4} \cdot 3.530} \approx 12 \text{ (}^\circ\text{К)}$$

где: $G = \delta_{\text{септ.}} \cdot a \cdot L \cdot \gamma = 0,3 \cdot 4,9 \cdot 300 \cdot 8 \approx 3,530 \text{ (г)}$ - вес материалов септума.

Такой прирост температуры, безусловно, привёл бы к переходу сверхпроводника в нормальное состояние: критическая температура для Nb-Ti составляет $9,7^\circ\text{К}$, для Nb₃Sn ~ $18,0^\circ\text{К}$.

Необходимо отметить, что при подсчёте ΔT не учтена теплоотдача к жидкому гелию в трубках (рис.8) за счёт теплопроводности по материалам септума и стягивающим планкам. Но и при учёте этой теплоотдачи сверхпроводимость СВМ нарушалась бы. Поэтому необходима защита СВМ от тепловыделения в его септуме при пересечении последнего ускоренным пучком. Это можно осуществить, например, с помощью предвключенного электростатического септума, отклоняющего пучок на незначительный угол, достаточный лишь для заброса пучка за 3 мм септум СВМ без "задевания" последнего.

Шинков
Меев
Н. Акму

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. H.H.Umstätter. Septum Magnets with 10 and 20 KoE Fields for Slow and Fast Ejection from the CPS. CERN 65-36, Geneva, 1965.
2. A.Ašner et al. Some Aspects of Magnet Design for High-Energy Physics. Proc. of the II Intern. Conf. on Magnet Technology (Oxford 1967), p. 3-31.
3. В.П.Заболотин и др. Препринт ОИЯИ, 9-4749, Дубна, 1969.
4. С.П.Тимошенко, С.Войновский-Кригер. Пластинки и оболочки. Перевод с английского. "Наука", 1966.
5. С.Э.Фриш, А.В.Тиморева. Курс общей физики, т.2, 1953
6. H.Bergmann. State-of-the-Art: Superconducting Magnets. ANL/NER 6818, IX.1968 (ANL).
7. И.Н.Гончаров. Сверхпроводящий магнит из $Nb-75\%Zr$ на 85кгс. Препринт ОИЯИ, P-2533, Дубна, 1965.
8. Н.Г.Анищенко и др. Сообщение ОИЯИ, 8-4882. Сверхпроводящая магнитная система с соленоидом внутренним диаметром 35 см. Дубна, 1969.
9. М.П.Малков и др. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. Госэнергоиздат, 1963.
10. Л.Б.Голованов. Препринт ОИЯИ, P8-3237. Теплофизические свойства некоторых многослойных изоляций при криогенных температурах. Дубна, 1967.
11. Е.Я.Казовский и др. Сверхпроводящие магнитные системы. Изд. "Наука" 1967 .

12. Н.Г.Анищенко и др. Препринт ОИЯИ, 8-3316. Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера. Часть П. Криогенные системы и сверхпроводящий соленоид. Дубна, 1967.
13. В.Е.Кейлин, Е.Ю.Клименко. Препринт ИАЭ, 100. Исследование сильноточных вводов в жидкий гелий, Москва, 1966.
14. Н.Г.Анищенко, Д.В.Приходько. Источники питания для сверхпроводящих соленоидов криогенного отдела ОИЯИ. ОИЯИ, Б2-13-4689. Дубна, 1969 .
15. The 1.8 Tesla, 4.8-M JD Bubble Chamber Magnet. Edited by C. Laverick. Argonne, Illinois 60439, June 1968, p.19.
16. M. Morpurgo. A Superconducting Solenoid Cooled by Forced Circulation of Supercritical Helium. CERN 69-25, 22.IX.1969.
17. Preprint Rutherford Laboratory, RPP/A 73. Experimental and Theoretical Studies of Filamentary Superconducting Composites. XI. 1969.
18. Journal of Applied Physics, vol. 40, No 5, April 1969.
19. Патент США № 3,098,181 от 16.VII.63, класс 317-158.
P.Cieffi. Magnetic Circuit Using Superconductor Properties.