

B381.  
B.85

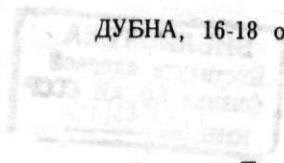
АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**ТРУДЫ  
ДЕВЯТОГО ВСЕСОЮЗНОГО  
СОВЕЩАНИЯ  
ПО УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ**

ДУБНА, 16-18 октября 1984 года



Том I

ДУБНА 1985

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-4 НА ЭНЕРГИЮ 5,3 ГэВ  
И ТОК  $2 \times 10$  мА

В.С.Арбузов, С.А.Беломестных, В.Г.Вещеревич, В.Н.Волков, Э.И.Горникер,  
М.М.Карлинер, С.А.Крутихин, Г.Я.Куркин, Н.Н.Лебедев, В.М.Меджидзаде,  
Ю.С.Невзоров, В.М.Петров, А.М.Пилан, И.К.Седяров, Е.Н.Харитонов,  
И.А.Шехтман

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В 1982 году в связи с недостаточной надежностью и необходимостью модернизации высоковольтного источника питания для гирокона ВЧ-система накопителя ВЭПП-4 [1] была переведена на резервное питание от ламповых генераторов.

Эта ВЧ-система состоит из шести ускоряющих резонаторов [2], пять из которых питаются от отдельных мощных усилительных каскадов на триодах ГИ-50А, установленных непосредственно у резонаторов и связанных с ними коаксиальными фидерами  $\phi$  160 мм (см. рисунок).

Каскады выполнены по схеме, аналогичной рассмотренной в [2]. В связи с установкой каскадов в радиационно-опасной зоне в их конструкции предусмотрена дистанционная перестройка частоты выходного контура и величины коэффициентов связи с нагрузкой и возбудителем.

Шестой резонатор возбуждается двумя выходными каскадами генератора, ранее использовавшегося для быстрой регулировки уровня ускоряющего напряжения [1].

Деление мощности возбуждения между пятью выходными каскадами и правильная фазировка возбуждающих напряжений осуществляется волноводно-коаксиальной системой деления [1]. Фазировка ускоряющих напряжений обеспечивается одинаковой настройкой выходных каскадов и равенством электрических длин линий, связывающих каскады как с резонаторами, так и с системой деления мощности.

Регулировка уровня возбуждения генератора, питающего пять резонаторов, осуществляется отдельной системой управления. Эта же система обеспечивает правильную фазировку ускоряющих напряжений между группой из пяти резонаторов и отдельным шестым резонатором. Для предотвращения перегрузки выходных каскадов при расстройке любого из пяти резонаторов введено ограничение уровня возбуждения генератора, если ток в петле какого-либо из резонаторов превышает заданную максимальную величину.

Предусмотрена быстродействующая защита выходных каскадов генераторов, которая за 50 мкс снимает анодное напряжение с триодов при анодном токе, вдвое превышающем номинальный уровень.

Суммарная мощность в шести резонаторах составляет 200 кВт на частоте 181 МГц. Мощность, отдаваемая каждым выходным каскадом, около 30 кВт. Такая мощность позволяет получить на зазоре резонатора напряжение с амплитудой 760 кВ.

Основным фактором, ограничивающим мощность, отдаваемую этим импульсным триодом в непрерывном режиме работы на высокой частоте, является нагрев сетки ВЧ-током анодно-сеточного контура. При удельной ВЧ-мощности, выделяемой этим током на сетке, равной допустимой удельной мощности рассеяния, амплитуда ВЧ-напряжения на аноде триода ГИ-50А составляет 4,8 кВ на частоте 181 МГц. Максимальная мощность, отдаваемая триодом в таком режиме работы, около 40 кВт, при электронном КПД около 50% была получена при испытаниях [2]. Однако длительная работа в режимах с амплитудой анодного ВЧ-напряжения более 4 кВ

приводит к перегреву основания сетки и замыканию её с катодом. Отказы такого рода наблюдаются примерно один-два раза в сутки при непрерывной работе лампы. При наличии быстродействующей защиты лампа после отключения из строя не выходит. Для исключения отказов этого типа эксплуатационный режим триода выбран таким образом, чтобы амплитуда анодного ВЧ-напряжения не превышала 4 кВ. Соответственно понижено напряжение источника питания до 6 кВ.

Длительная эксплуатация семи выходных каскадов в ВЧ-системе накопителя ВЭПП-4 при мощности, отдаваемой каждым 15+30 кВт, показала, что срок службы ламп около 5000 часов.

Электрическая длина линии передачи между сечениями эквивалентного представления выходных каскадов и резонаторов кратна нечетному числу четвертей длины волны. При такой длине линии ток в линии ограничен величиной напряжения на аноде выходного каскада в критическом режиме работы. Это свойство предотвращает возможность аварийной перегрузки фидера и петель связи резонатора при неправильной настройке ВЧ-системы. Кроме того, при неизменном ускоряющем напряжении уменьшение тока пучков в накопителе в процессе цикла эксперимента приводит к понижению ВЧ-напряжения в анодно-сеточном контуре. Соответствующее снижение ВЧ-мощности, выделяющейся на сетке лампы, повышает её надежность и долговечность.

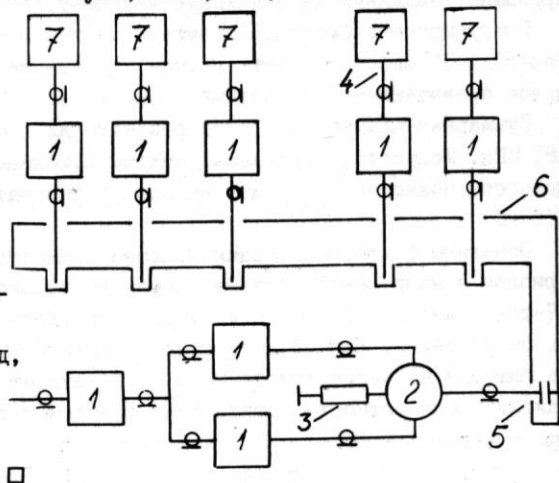
Частотная характеристика импеданса ускоряющей системы, образованной резонатором и генератором, связанными четвертьволновой линией, такова, что небольшая расстройка выходного контура генератора выше рабочей частоты или малое укорочение длины линии обеспечивают затухание когерентных фазовых колебаний сгустков в накопителе.

Рассмотренная ВЧ-система обеспечивает устойчивую работу накопителя ВЭПП-4 при энергии до 5,3 ГэВ с суммарным током пучков до 20 мА, а при энергии 1,8+4,7 ГэВ когерентные фазовые колебания сгустков не возникают при суммарном токе пучков до 40 мА.

## Л и т е р а т у р а

1. Арбузов В.С. и др. Многорезонаторная высокочастотная система накопителя ВЭПП-4 на энергию 5,5 ГэВ. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982. Дубна, 1983, т.1, с.143-145.
2. Вещеревич В.Г. и др. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-3 на энергию 3 ГэВ. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1974. М.: Наука, 1975, т.П, с.337-340.

Блок-схема резервной ВЧ-системы накопителя ВЭПП-4. 1 - усилительный каскад на триоде ГИ-50А, 2 - мост сложения мощностей, 3 - резистор 65 Ом, 4 - коаксиальный фидер, 5 - волновод, 6 - система деления мощности, 7 - резонатор.



## ДИНАМИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ВЧ-ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

М.Ф.Ворогушин

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры

им.Д.В.Фурьева, Ленинград

В.Н.Мальшев

Ленинградский электротехнический институт им.В.И.Ульянова (Ленина)

Система ВЧ-питания резонансных ускорителей, работающих в импульсном режиме, должна обеспечить надежное функционирование генератора с учетом допустимой величины коэффициента отражения в тракте. Высокая добротность /единицы-десятки тысяч/ ускоряющей структуры (УС) обуславливает значительное /несколько мкс/ время переходного процесса, в течение которого изменяются амплитуда и фаза отраженной волны, и, следовательно, условия согласования. Назовем согласование генератора с инерционной нагрузкой в переходном режиме динамическим согласованием, а соответствующие устройства, решающие эту задачу, устройствами динамического согласования.

Потребуем, чтобы при воздействии прямоугольного фронта радиоимпульса входной коэффициент отражения  $\rho_{вх}(t)$  не превышал допустимую величину  $\rho_{дон}$  во время всего переходного процесса:

$$\forall t, t \in (0, +\infty), \quad |\rho_{вх}(t)| \leq \rho_{дон}. \quad (I)$$

Необходимо определить предельно допустимый стационарный коэффициент передачи мощности в УС при условии (I) и разработать методику оптимального синтеза устройств динамического согласования.

Будем считать УС согласованной с трактом на рабочей частоте, что не ограничивает общность постановки оптимизационной задачи, так как имеющееся рас-согласование всегда может быть учтено в матрице рассеяния согласующего четырехполюсника. Поиск оптимального решения задачи динамического согласования будем производить на множестве частотонезависимых четырехполюсников, так как в узкой рабочей полосе частот ускоряющего резонатора этому условию удовлетворяют практически все реально используемые элементы тракта.

Как показано в работе [1], модуль входного коэффициента отражения при воздействии падающей волны с огибающей вида единичного скачка удовлетворяет соотношению

$$(|\rho_{вх}| \leq |\rho_{вх}|_{t=+0}) \vee (|\rho_{вх}| \leq |\rho_{вх}|_{t \rightarrow \infty}). \quad (2)$$

Другими словами, при синтезе согласующего четырехполюсника с ограничением (I) достаточно контролировать входной коэффициент отражения лишь в начале переходного процесса и в установившемся режиме.

Перейдем к решению задачи оптимального выбора параметров согласующего четырехполюсника. Известно, что использование в тракте невзаимных устройств решает проблему динамического согласования. Однако часто, особенно в системах ВЧ-питания с высокой рабочей мощностью, применение ферритовых устройств нежелательно. Поэтому представляет интерес разработка методики синтеза со-

гласующих устройств на взаимных элементах, и в дальнейшем будем считать  $S_{21} = S_{12}$ .

Вначале рассмотрим ВЧ-систему с однорезонаторной ускоряющей структурой. Запишем условия, предъявляемые к элементам матрицы рассеяния на основании (1), учитывая (2),

$$\left\{ \begin{array}{l} |S_{11}| \leq \rho_{\text{доп}}, \\ |S_{11} - S_{21}^2 / (1 + S_{22})| \leq \rho_{\text{доп}} \end{array} \right. \quad (3)$$

Решая систему неравенств (3) с учетом физической реализуемости матрицы рассеяния четырехполюсника [1], получим выражения для максимально достижимого коэффициента передачи мощности  $K_p = S_{21} S_{21}^*$  и оптимальных  $S$ -параметров симметричного согласующего четырехполюсника:

$$\left. \begin{array}{l} S_{11} = (1 - \rho_{\text{доп}}) / (3 + \rho_{\text{доп}}) \\ S_{21} = 2(\rho_{\text{доп}} + 1) / (\rho_{\text{доп}} + 3) \\ K_{p \text{ max}} = 4 [(\rho_{\text{доп}} + 1) / (\rho_{\text{доп}} + 3)]^2 \end{array} \right\} \rho_{\text{доп}} \geq \sqrt{5} - 2, \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_{11} = \rho_{\text{доп}} \\ S_{21} = \sqrt{2 \rho_{\text{доп}} (1 + \rho_{\text{доп}})} \\ K_{p \text{ max}} = 2 \rho_{\text{доп}} (1 + \rho_{\text{доп}}) \end{array} \right\} \rho_{\text{доп}} \leq \sqrt{5} - 2 \quad (5)$$

и несимметричного согласующего четырехполюсника:

$$\left. \begin{array}{l} S_{11} = \rho_{\text{доп}} \\ S_{22} = (1 - 3\rho_{\text{доп}}) / (1 + \rho_{\text{доп}}) \\ S_{21} = 2 \sqrt{\rho_{\text{доп}} (1 - \rho_{\text{доп}}) / (1 + \rho_{\text{доп}})} \end{array} \right\} \rho_{\text{доп}} \leq 1/3, \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_{22} = 0 \\ S_{11} = (1 - \rho_{\text{доп}}) / 2 \\ S_{21} = \sqrt{(1 + \rho_{\text{доп}}) / 2} \end{array} \right\} \rho_{\text{доп}} \geq 1/3. \quad (7)$$

Соотношения (4) + (7) определяют предельно достижимый коэффициент передачи мощности от генератора в однорезонаторную нагрузку в зависимости от допустимого входного коэффициента отражения, а также позволяют синтезировать соответствующее устройство согласования симметричного либо несимметричного типа.

В ВЧ-системе с многорезонаторной ускоряющей структурой модуль коэффициента отражения УС в начале переходного процесса численно равен параметру связи  $\rho$  [2]. Можно показать, что при этом матрица рассеяния оптимального согласующего устройства определяется из системы неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{11} S_{11}^* + S_{22} S_{22}^* + 2 S_{21} S_{21}^* - |S_{11} S_{22} - S_{21}^2|^2 \leq 1 \\ S_{11} S_{11}^* + S_{21} S_{21}^* \leq 1 \\ S_{22} S_{22}^* + S_{21} S_{21}^* \leq 1 \\ S_{11} S_{11}^* \leq \rho_{00n} \\ |S_{11} - \delta S_{21}^2 / (1 + \delta S_{22})| \leq \rho_{00n} \end{array} \right. \quad (8)$$

Заметим, что при  $\delta = \pm 1$  неравенства (8) справедливы для ВЧ-системы в однорезонаторной УС. Рассмотрим симметричное взаимное устройство согласования ( $S_{11} = S_{22}$ ,  $S_{21} = S_{12}$ ). При решении системы (8) следует сравнивать два конкурирующих локальных экстремума коэффициента передачи мощности  $K_p = S_{21} S_{21}^*$ .

Первый характеризуется вещественностью коэффициентов матрицы устройства согласования. При этом справедливо

$$\left. \begin{array}{l} S_{22} = S_{11} = \rho_{00n} \\ S_{21}^2 = 2\rho_{00n} (1 + \delta \rho_{00n}) / \delta \end{array} \right\} \rho_{00n} \leq \rho_{01}, \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_{11} = S_{22} = (\delta - \rho_{00n}) / [1 + \delta(2 + \rho_{00n})] \\ S_{21} = (1 + \delta)(1 + \rho_{00n}) / [1 + \delta(2 + \rho_{00n})] \end{array} \right\} \rho_{00n} \geq \rho_{01}, \quad (10)$$

$$\text{где } \rho_{01} = [-\delta - 1 + \sqrt{2\delta^2 + 2\delta + 1}] / \delta.$$

Второй экстремум  $K_p$  достигается при

$$S_{11} = S_{22} < 0, \quad S_{21} = j |S_{21}|.$$

При этом справедливо

$$\left. \begin{array}{l} S_{11} = S_{22} = -\rho_{00n} \\ S_{21} S_{21}^* = 2\rho_{00n} (1 - \rho_{00n} \delta) / \delta \end{array} \right\} \rho_{00n} \leq \rho_{02}, \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_{11} = S_{22} = (\rho_{00n} - \delta) / (1 - \rho_{00n} \delta) \\ S_{21} S_{21}^* = 1 - S_{11}^2 \end{array} \right\} \rho_{00n} \geq \rho_{02}, \quad (12)$$

$$\text{где } \rho_{02} = (1 - \sqrt{1 - \delta^2}) / \delta.$$

Подчеркнем, что соотношения (12) определяют унитарную матрицу, т.е. в этом случае КПД устройства согласования равен единице (хотя  $K_p = 1 - S_{11}^2 < 1$ ).

Аналитически определить, какой из указанных локальных экстремумов является глобальным в том или ином случае, затруднительно, однако в конкретных условиях достаточно сравнить результаты (9), (10) и (11), (12).

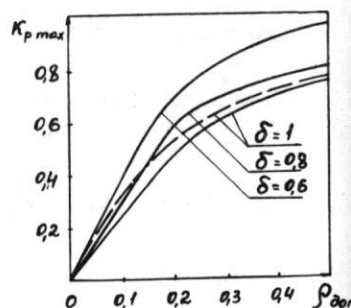
Результаты расчетов по изложенной методике приведены на рисунке в виде зависимости максимально достижимого коэффициента передачи мощности от допустимого входного коэффициента отражения в ВЧ-системах с однорезонаторной ( $\delta = 1$ ) и многорезонаторной УС. Видно, что использование несимметричного четырехполюсника в случае однорезонаторной УС (пунктирная кривая) позволяет несколько улучшить условия динамического согласования. В случае применения несимметричного устройства сопряжения для многорезонаторной УС аналитическое решение системы (8) оказалось затруднительным, однако численные расчеты показали, что выигрыш по сравнению с симметричными устройствами невелик и составляет единицы процентов.

Таким образом, выбором параметров взаимного диссипативного устройства согласования можно обеспечить заданный коэффициент отражения на выходе генератора в течение всего переходного процесса. При этом приходится мириться с некоторым снижением коэффициента передачи мощности. В системах с многорезонаторными ускоряющими структурами условия динамического согласования выполняются при больших, чем для однорезонаторных УС значениях коэффициента передачи мощности. Самостоятельное значение имеет тот факт, что при использовании частотно-независимого устройства согласования и при нулевой частотной расстройке модуль входного коэффициента отражения максимален либо в начале переходного процесса, либо в установившемся режиме. Заметим, что, хотя все полученные результаты непосредственно относятся к ВЧ-системам на базе генератора с независимым возбуждением, однако они справедливы и для ВЧ-систем с автогенераторами, работающими в режиме затягивания частоты.

#### Л и т е р а т у р а

1. М.Ф.Ворогушин, В.Н.Малышев. Динамическое согласование в системах ВЧ-питания резонаторных ускорителей. Препринт В-0645., - М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, II с.
2. М.Ф.Ворогушин, В.Н.Малышев. Динамические характеристики многорезонаторной ускоряющей структуры. Препринт В-0644, - М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, 8 с.

Максимально достижимый коэффициент передачи мощности от генератора в ускоряющую структуру в зависимости от допустимого входного коэффициента отражения.



□

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ НИОБИЕВЫЙ РЕЗОНАТОР - ПРОТОТИП ЯЧЕЙКИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

В.В.Анашин, С.И.Бибко, В.Г.Вещеревич, В.Н.Волков, М.М.Карлинер,  
Б.З.Персов, А.Т.Попов, И.К.Седяров, Е.И.Фадеев

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

К.С.Ковалев

Научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности, Москва

Применение сверхпроводящих ускоряющих ВЧ-структур позволит существенно снизить потери высокочастотной мощности в стенках по сравнению с обычными структурами, что является перспективным для ускорителей и накопителей частиц высоких энергий [1].

В ИЯФ СО АН СССР рассматривается возможность применения сверхпроводящей биериодической структуры, работающей на типе колебаний  $\pi/2$  (рис.1). Так как поля в резонаторах связи малы, структуру можно сделать разъемной по резонаторам связи, что значительно упрощает изготовление и эксплуатацию. Ячейки структуры изготавливаются из листового ниобия. Форма рабочих ячеек близка к сфероидальной: она удобна при технологических операциях, резонаторы такой формы имеют достаточно высокие параметры, характеризуются отсутствием вторично-электронного ВЧ-разряда. Проектные параметры структуры приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1  
П а р а м е т р ы у с к о р я ю щ е й с т р у к т у р ы

1. Рабочая частота при $T = 1,8 \text{ К}$ , $f_{\pi/2}$	1179 МГц
2. Коэффициент связи между ячейками, $k_{св}$	4,6 %
3. Эффективное характеристическое сопротивление одной ускоряющей ячейки, $R_{уск. (1)}$	66 Ом
4. Коэффициент перенапряжения электрического поля, $E_{\text{макс.}}/E_{\text{уск.}}$	2,15
5. Отношение максимальной индукции магнитного поля на поверхности к ускоряющему электрическому полю, $B_{\text{макс.}}/E_{\text{уск.}}$	4,17 $\frac{\text{мТ}}{\text{МВ/м}}$
6. Число резонаторов в одной ускоряющей секции, $N$	13(7+6)
7. Проектное ускоряющее поле, $E_{\text{уск.}}$	3 МВ/м
8. Проектная добротность, $Q_0$	$1 \cdot 10^9$

Для отработки технологии изготовления и исследования свойств сверхпроводящих резонансных систем были изготовлены одиночные резонаторы, имеющие форму и размеры рабочей ячейки ускоряющей структуры. Испытаны два резонатора из листового ниобия толщиной 4 мм.

Первый резонатор - из технического ниобия Nb1 с отношением электросопротивлений  $\gamma = R (300 \text{ К})/R (10 \text{ К}) = 10 + 22$ . Чашки штамповались из листовых заготовок, патрубки - из цельнотянутых труб. Детали резонатора жим-



полировались и сваривались изнутри и снаружи электронным пучком в вакууме. После сварки резонатор отжигался при температуре 1220 К в вакууме  $6 \cdot 10^{-3}$  Па и химполировался со снятием 50 мкм. Сушка и хранение резонатора до установки на стенд осуществлялись в атмосфере сухого азота.

Второй резонатор - из чистого ниобия Nb<sub>р2</sub>, исходное значение  $\gamma = 100 \pm 160$ . В отличие от первого резонатора чашки после штамповки отжигались при температуре 920 К. Как показали измерения на образцах, эта температура достаточна для рекристаллизации металла этой марки. После отжига детали химполировались, сваривались, и готовый резонатор химполировался со снятием 20 мкм.

Испытания резонаторов проводились на автоматизированном стенде [2]. В состав оборудования стенда входят: гелиевый криостат с магнитным экраном, радиоэлектронная аппаратура для возбуждения резонатора, измерительная аппаратура, микро-ЭВМ "Электроника-60" с терминальными устройствами. Испытываемый резонатор включается в цепь обратной связи, стабилизирующей частоту задающего ВЧ-генератора. ЭВМ используется для автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных.

Возбуждение резонатора и индикация ВЧ-сигнала в нем осуществляется с помощью двух коаксиальных линий, связь с которыми можно регулировать в широких пределах (рис.2). При работе производится согласование с передающей линией, а связь с приемной линией делается очень слабой. Поля в резонаторе определяются по величине проходящей в него мощности, а добротность находится по декременту затухания.

Для обнаружения мест поверхностных дефектов полезно измерение температуры поверхности резонатора при подаче ВЧ-мощности [3]. С этой целью применяется система резистивных термодатчиков, которые прижимаются к резонатору с наружной стороны.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

№ резонатора	T = 4,2 К		T = 1,8±2,2 К		Примечания
	Q <sub>o</sub>	E <sub>пуск.макс.</sub> , МВ/м	Q <sub>o</sub>	E <sub>пуск.макс.</sub> , МВ/м	
I	$1,7 \cdot 10^8$	-	$2,4 \cdot 10^8$	-	После изготовления
I	$1,7 \cdot 10^8$	-	-	-	3 месяца под вакуумом
I	$3,6 \cdot 10^6$	-	-	-	6 месяцев на атмосфере
I	$2,4 \cdot 10^8$	1,3	$4,6 \cdot 10^8$	1,8	После повторной химполировки
I	$1,1 \cdot 10^8$	1,0	-	-	После прогрева 24 часа в вакууме при T = 150°С
2	$1,9 \cdot 10^8$	2,5	$2,5 \cdot 10^8$	3,1	После изготовления
2	$2,5 \cdot 10^8$	3,8	$3,0 \cdot 10^8$	3,0	После ВЧ-тренировки
2	-	-	$6,2 \cdot 10^8$	4,3	После ВЧ-тренировки
2	$1,6 \cdot 10^8$	-	$2,3 \cdot 10^8$	2,5	Течь в уплотнении

Проведенные испытания показали, что добротности резонаторов из технического и чистого ниобия при  $T = 4,2$  К близки по величине. Малое увеличение добротности при понижении температуры до 2 К свидетельствует о наличии большого остаточного сопротивления. Длительное хранение под вакуумом не сказывается на величине добротности. Натекание в объем гелия, а тем более напуск атмосферы приводят к понижению добротности, и для ее восстановления требуется повторная химполировка. Тренировка ВЧ-полем позволила вдвое повысить величину добротности резонатора № 2.

Наибольшее ускоряющее поле  $- 4,3$  МВ/м  $-$  получено в резонаторе из чистого ниобия. В резонаторе из технического ниобия предельные поля вдвое ниже. Вплоть до предельных полей добротность уменьшается слабо (рис.3), а после пробоев, как правило, понижается. При испытаниях резонатора № 2 снаружи криостата зарегистрировано рентгеновское излучение. Наблюдался эффект тренировки: при максимальных полях после серии пробоев интенсивность излучения уменьшилась с 20 мР/час до 2 мР/час.

С помощью системы термоконтроля в резонаторе № 2 было замечено локальное повышение температуры на 350 мК при  $E_{\text{уск.}} = 2,5$  МВ/м (рис.4). Нагретая область находилась на плоской части нижней чашки резонатора. После вскрытия в этом месте было обнаружено инородное включение. Датчики, расположенные вблизи сварного шва, не показали заметных температурных отклонений.

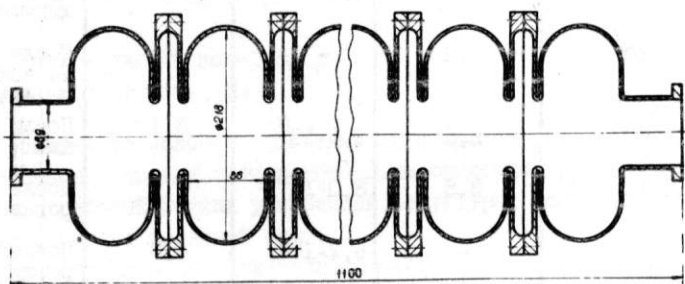
Выводы:

При проектировании сверхпроводящих ВЧ-структур, предназначенных для работы в ускорителях и накопителях, ставилась задача получения ускоряющего поля не менее 3 МВ/м при добротности  $10^9$ .

Полученный нами лучший результат для резонатора из листового ниобия марки Нбр2 ( $Q_0 = 6,2 \cdot 10^8$ ,  $E_{\text{уск.}} = 4,3$  МВ/м) близок к этим требованиям.

#### Л и т е р а т у р а

1. Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-структуры. М., Энергоиздат, 1983.
2. Вещеревич В.Г., Волков В.Н., Куркин Г.Я., Седяров И.К., Стенд для исследования сверхпроводящих резонаторов. Вопросы атомной науки и техники, сер. "Техника физического эксперимента", вып.2 /14/, с.84, ХФТИ АН УССР, Харьков, 1983.
3. Bernard Ph., Cavallari G., Chiveri E. et al. Experiments with the CERN superconducting 500 MHz cavity. Nucl. Instrum. and Meth., 1981, Vol. 190, No. 2, p. 257.



Р и с. 1. Ускоряющая структура.

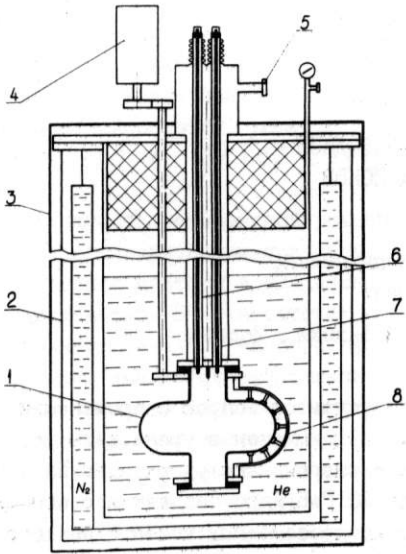
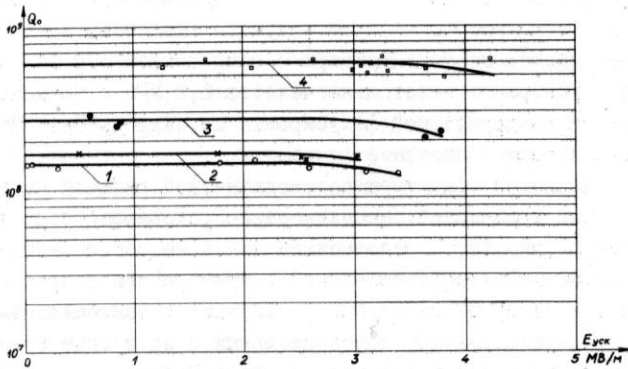
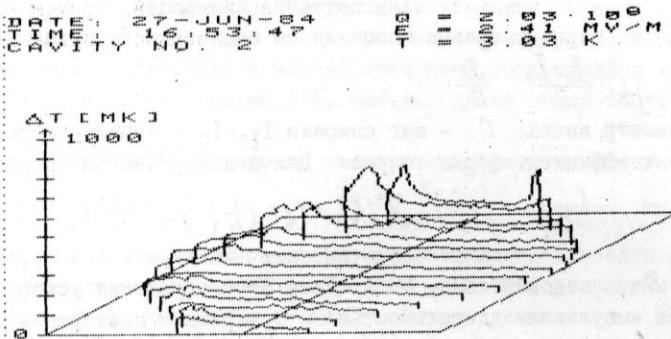


Рис.2. Схема испытания резонатора. 1 - резонатор, 2 - корпус кристалла, 3 - магнитный экран, 4 - шаговый двигатель, 5 - откачка резонатора, 6,7 - линии связи, 8 - рамка с термоматчиками.



Р и с. 3. Зависимость добротности резонатора № 2 от напряженности ускоряющего поля. Кривые 1,2,3 - при  $T = 4,2 \text{ K}$ ; кривая 4 - при  $T = 2 \text{ K}$ .



Р и с. 4. Распределение температуры по поверхности резонатора № 2.

□

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ "СИБИРЬ-1"

В.М.Боровиков, Ю.И.Голубенко, Б.А.Гудков, А.С.Калинин, В.В.Каргальцев,  
В.Н.Корчуганов, Э.А.Купер, Е.Б.Левичев, А.В.Леденев, А.С.Медведко,  
А.Н.Мезенцев, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, В.Ф.Пиндюрин, А.Н.Путьмаков,  
В.В.Решков, А.С.Соколов, Н.П.Уваров

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В 1979 году в ИЯФ СО АН СССР были начаты работы по созданию накопительно-го комплекса - специализированного источника синхротронного излучения (СИ) - для ИАЭ им.И.В.Курчатова /1/. Комплекс служит для получения интенсивных пучков СИ в области длин волн 0,1-2000 Å и включает в себя основной накопитель на энергию 2,5 ГэВ, бустерный накопитель на энергию 450 МэВ, инжектор - ЛУЭ "Факел" (ИАЭ им.И.В.Курчатова) и электронно-оптические каналы (ЭОК) для транспортировки пучков. В 1983 году в ИАЭ им.И.В.Курчатова был осуществлен пуск первой очереди комплекса - бустерного накопителя электронов "Сибирь-1". Быстрому запуску накопителя во многом способствовала полная автоматизация управления и контроля систем комплекса "Сибирь-1"

Система управления и контроля накопителя "Сибирь-1" состоит из двух периферийных ЭВМ Электроника-60 (ЦМ), центральной ЭВМ СМ-4 (ЦМ) и аппаратуры управления и контроля. Одна ЦМ управляет электронно-оптическим каналом, другая накопителем. Координацию работы комплекса в целом, хранение и обработку больших объемов информации обеспечивает ЦМ. В системе имеется более 100 каналов управления и около 700 каналов контроля. Аппаратура управления выполнена в стандарте КАМАК и сопрягается с микро-ЭВМ при помощи контроллера с последовательной магистралью, разработанного в ИЯФ /2/. В системе используется 16 разновидностей управляющих и измерительных модулей КАМАК, суммарным количеством порядка 60.

Периферийная ЭВМ канала транспортировки обеспечивает:

- Управление системой питания импульсных поворотных электромагнитов и линз, магнитное поле в которых формируется разрядом накопительных емкостей С. Ток через индуктивную нагрузку L (обмотку электромагнита) изменяется по закону, близкому к синусоидальному, и достигает максимума через  $\tau \sim LC$ , в момент перепуска пучка. Зарядное напряжение  $U_c$  на емкости задается ЦАПом с промежуточным преобразованием цифрового кода в сигнал с широтно-импульсной модуляцией - ШИМ. Передача ШИМ-сигнала к ЦАП по одному кабелю облегчает экранировку узлов, наиболее чувствительных к наводкам. Момент разряда емкости на нагрузку  $T_c$  задается генератором временных интервалов ГВИ.  $U_c$  и  $T_c$  управляются от ЭВМ независимо для каждого элемента. Автоматизированный контроль  $U_c$  ведется АЦП со встроенной памятью на 256 16-разрядных слов через коммутатор аналоговых сигналов КАС, а  $T_c$  - измерителем временных интервалов ИВИ. Форма и амплитуда магнитного поля в элементе контролируется измерителем импульсных сигналов БИИП.

- Управление системой питания электромагнитов-корректоров траектории пучка при помощи многоканальных ЦАП. Использование бесконтактного шунта для измерения питания корректоров позволило контролировать токи и напряжения одним АЦП с КАС.

- Контроль параметров сгустка электронов системой из 10 магнитоиндукционных и 8 вторично-эмиссионных датчиков. Сигналы с датчиков, обработанные ЭВМ,

дают информацию о токе, траектории, профиле пучка в плоскости, перпендикулярной оси пролета. Количество датчиков и их расположение представляется достаточным для решения в дальнейшем задачи автоматического регулирования траектории перепускаемого пучка.

— Управление системой инъекции пучка в накопитель аналогично управлению импульсными электромагнитными, с той разницей, что малые характерные временные интервалы в системе потребовали применения измерителей и генераторов временных интервалов с большей разрешающей способностью.

Периферийная ЭВМ накопителя обеспечивает:

— Управление системой питания поворотных магнитов и линз, магнитное поле в которых формируется мощными системами стабилизации постоянного тока, управляемыми ЦАП с погрешностью  $\sim 0,01\%$  для ведущего поля и  $\sim 0,1\%$  для остальных систем. Контроль токов и напряжений в системе ведется цифровым вольтметром типа ШИ516, сопряженным с ЭВМ.

— управление высокочастотной ускоряющей системой с возможностью оперативной перестройки амплитуды, фазы и частоты напряжения на ускоряющем резонаторе.

— Термоконтроль шинопроводов и воды в системах охлаждения.

При превышении заданных пределов температуры предусмотрена возможность сообщения об этом оператору, включения сигнализации в пультовой управления, а в аварийной ситуации — отключения источников питания без участия оператора и ЭВМ.

— Контроль вакуума по току магнитозарядных насосов в диапазоне  $5 \cdot 10^{-5}$  Тор —  $0,5 \cdot 10^{-10}$  Тор. Система представляет собой многоканальный интегрирующий вольтметр с разнесенной аналоговой частью. При ухудшении вакуума до уровня предупреждения производится предупреждение оператора через ЭВМ, а при аварийном ухудшении — необходимые отключения в системах питания накопителя и включение сигнализации.

Программное обеспечение системы управления комплексом реализовано под мультипрограммными операционными системами реального времени *RSX - IIM* (для ЦМ) и *RSX - IIS* (для ПМ). Программы управления работают в ПМ, оперативная память которой разбита для этого на несколько подразделов, а ЦМ служит для хранения и обработки больших объемов информации. Обмен информацией между ПМ и ЦМ осуществляется через разработанную в ИЯФ СО АН СССР линию связи /3/.

Основой для функционирования всех управляющих программ являются таблицы двух типов, которые хранятся на магнитных дисках ЦМ в виде специально организованных файлов. Таблицы одного типа являются описанием установки и всех ее частей, требующих контроля или управления, и содержат информацию об адресах, функциях, особенностях исполнительных устройств, коэффициенты перевода и другие необходимые параметры. При изменении конфигурации системы управления или модификации самой установки достаточно только изменить или дополнить с помощью специального редактора эту таблицу, не трогая остального обеспечения. Таблицы второго типа являются полным описанием режима работы комплекса и содержат значения цифрового кодов, которые необходимо занести в устройства для обеспечения данного режима.

Все программное обеспечение удобно разделить на несколько условных уровней:

— Узкоспециализированные модули — подпрограммы для управления конкретным исполнительным устройством, максимально адаптированные применительно ко всем его функциональным особенностям. Модули реализованы на языке нижнего уровня

**MACRO** (что позволило значительно уменьшить время отклика на событие и занимаемую память) и сведены в библиотеку. При добавлении нового исполнительного устройства достаточно ввести в библиотеку новый описывающий его модуль.

- Специальная программа **BANK**, использующая библиотеку модулей. Только она может непосредственно обращаться к оконечным устройствам, учитывая требования синхронизации - этим устраняется возможность конкуренции и конфликтных ситуаций.

- Программы контроля управления, программы тестировки и диагностики систем и устройств. Они обмениваются с программой (с исполнительными устройствами) по определенному протоколу через область памяти общего доступа (**COMMON** - область), с одной стороны, и с таблицами-описаниями в ЦМ - с другой. Эти программы выполнены на языке **FORTRAN** и при необходимости легко модифицируются.

- Процесс - последовательность описаний, оперирующая с таблицами режимов и позволяющая выполнять сложные синхронизованные изменения режима работы накопителя в целом (инжекция, накопление, подъем энергии и пр.) практически без участия оператора. Последовательность описаний легко изменяется с помощью редактора.

- Благодаря такому разделению матобеспечение обеспечивает гибкость управления любой системой, функциональными частями систем и комплексом в целом, позволяет быстро и с минимальными затратами учитывать изменения в структуре установки.

Применение последовательной связи в системе управления позволило перенести периферийные ЭВМ из зала ЭВМ в пультовую накопителя и сосредоточить там же средства отображения информации: буквенно-цифровые дисплеи, графические цветные дисплеи и печатающие устройства. Информация о состоянии комплекса и параметрах пучка электронов индицируется в удобной и наглядной форме.

Соблюдение принципа модульности при разработке как аппаратуры, так и программного обеспечения придает системе управления следующие важные качества: надежность, простоту диагностики неисправности и восстановления работоспособности, возможность дополнительного расширения и модификации установки с минимальными затратами, возможность проведения предварительной отладки аппаратуры и матобеспечения на стендах с практически полной имитацией условий работы комплекса. Соблюдение принципа модульности представляется очень важным в системах, которым в дальнейшем предстоит значительное и не всегда достаточно прогнозируемое развитие.

Ведущиеся в настоящее время на накопителе электронов "Сибирь-I" работы по дальнейшему улучшению характеристик пучка показывают правильность выбранных принципов построения описанной системы управления.

#### Л и т е р а т у р а

1. Анашин В.В. и др. Проект накопителя электронов на энергию 450 МэВ специализированного источника синхротронного излучения. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т. I, стр. 306.
2. Нифонтов В.И. и др. Контроллер и последовательной магистраль для ЭВМ "Электроника-60", функционально совместимый с СС-II. Труды III Всесоюзного симпозиума по проблемам модульных ИВС. Изд. ИЯИ АН СССР, Москва, 1983, стр. 284.
3. Бажан А.И. и др. Многомашинный комплекс автоматизации физического эксперимента. Труды II Всесоюзного семинара по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях. Изд. ИЯЭ СО АН СССР, Новосибирск, 1982, стр. 41.

□

## ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ БЭП

В.В.Анашин, М.С.Гильгенгорн, И.А.Кооп, В.Н.Осипов, В.В.Пай,  
Э.М.Трахтенберг, Г.М.Черных, Ю.М.Шатунов, Л.М.Шеголев

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Накопитель БЭП предназначен для инжекции электронов и позитронов в ВЭПП-2М, а также для отработки методики получения интенсивных пучков электронов, пригодных для инжекции во ВЛЭПП [1].

Максимальная проектная энергия накопителя - 0,7 ГэВ, расчетный ток - 2А. Необходимое давление остаточного газа в различных режимах работы составляет  $10^{-6} + 10^{-7}$  Па и определяется десорбцией газа со стенок вакуумной камеры под действием синхротронного излучения.

Скорость газоотделения, вызванного синхротронным излучением, можно определить через эффективность десорбции  $\alpha$  ( $\frac{\text{мол}}{\text{фот}}$ ):

$$q \left( \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{сек} \cdot \text{м}} \right) \approx 0,49 \cdot \frac{E(\text{ГэВ}) \cdot J(\text{а})}{R(\text{м})} \cdot \alpha$$

Экспериментальные данные, полученные в процессе эксплуатации накопителей с алюминиевыми вакуумными камерами в Стэнфорде (США) и Гамбурге (ФРГ), дают основания на получение коэффициента десорбции  $< 10^{-6}$ .

При значении  $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-7}$  мол/фот для получения рабочего давления  $10^{-6}$  Па необходима скорость откачки примерно  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В существующей магнитной структуре с учетом того, что синхротронное излучение падает только на часть вакуумной камеры в поворотных магнитах, эффективность применения традиционных "встроенных" магниторазрядных насосов оказалась достаточно низкой, поэтому откачка накопителя сосредоточена в прямолинейных промежутках.

В этом случае, среднее давление в кольце определяется, как легко показать, следующим выражением

$$\bar{p} = q \frac{2\pi R}{S} + q \frac{(L - \sqrt{2aR})^2}{12 \cdot U} \left( 1 + \sqrt{\frac{8aR}{L^2}} \right),$$

где  $L$  - длина вакуумной камеры в поворотном магните элемента периодичности,  $U$  - удельная проводимость камеры,  $2a$  - радиальная апертура,  $S$  - суммарная производительность насосов. При выбранных значениях  $2a = 6 \cdot 10^{-2}$  м,  $R = 1,29$  м,  $U = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}$ ,  $S = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $L = 1,25$  м рабочее давление должно составить  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$  Па.

Необходимо отметить, что при изменении направления вращения пучка в накопителе среднее давление при тех же параметрах должно уменьшаться в 3,5 раза за счет изменения распределения синхротронного излучения по длине. Вакуумная камера эллиптического сечения элемента периодичности изготовлена из алюминиевого сплава  $AM_4C$  методом горячего прессования; наружная стенка с отверстием для охлаждающей жидкости является распределенным приемником синхротронного излучения. Такая технология изготовления вакуумной камеры дает следующие преимущества:

1. Алюминий - превосходный высоковакуумный материал, обладающий малой скоростью десорбции после технологической обработки. Значение коэффициента фотостимулированной десорбции для алюминия после очистки горячей камеры тлеющим разрядом в среде аргона одно из минимальных.

Р и с. 1. Поперечное сечение вакуумной камеры  
(сплав АМцС).

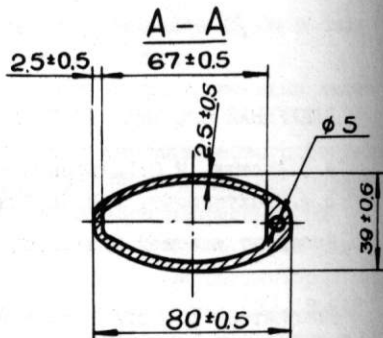
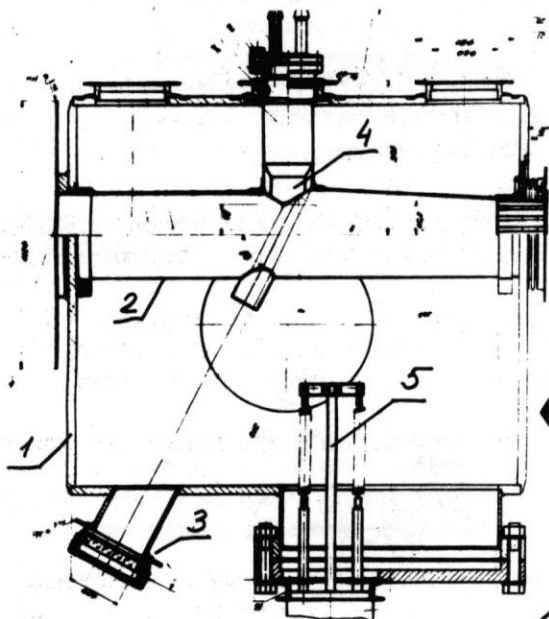
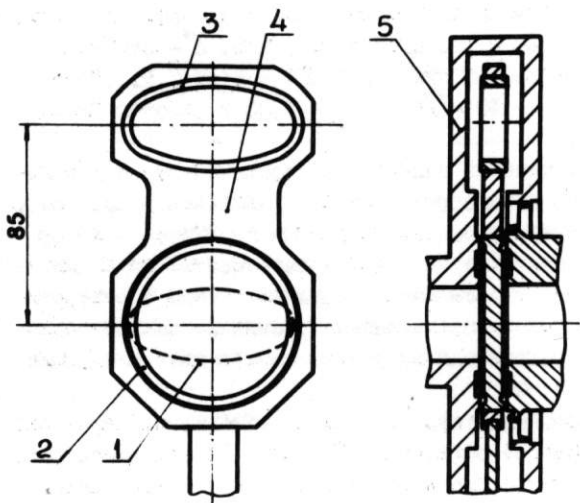
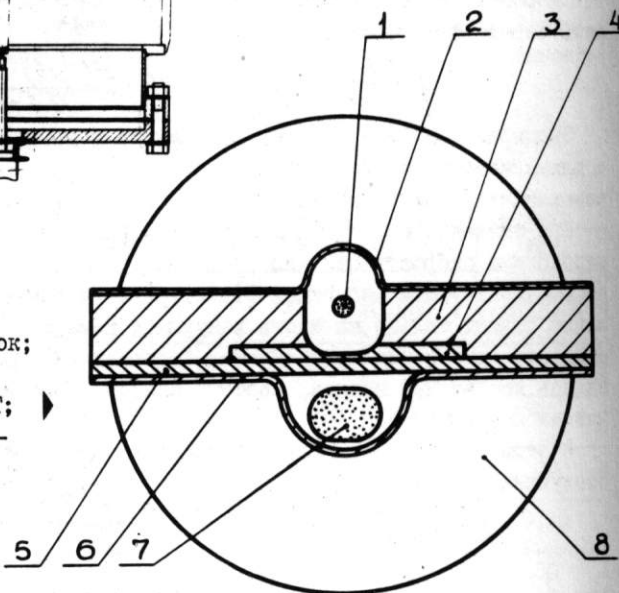


Рис.2. Вид в плане стандартного прямолинейного промежутка. 1 - корпус, 2 - перфорированная труба, 3,4 - окно и зеркало для вывода СИ, 5 - испаритель титана.

Рис.3. Схематическое изображение наружной шины септум-магнита. 1 - накопленный пучок; 2,3,6 - элементы "сэндвича", выполненные из стали 12Х18Н9Т; 4 - ферромагнитный экран; 5 - токоведущая часть (БрХ-0,5); 7 - инжектируемый пучок; 8 - торцевой присоединительный фланец.



Р и с. 4. Принципиальная схема шибера Ду-80 без резонирующей полости.



2. Можно изготовить вакуумные камеры с минимальным изменением поперечного сечения камеры по длине для уменьшения тенденции к возбуждению высокочастотных мод.

3. Упрощается объединение охлаждаемого приемника излучения и вакуумной камеры в один узел.

На рис.1 показано поперечное сечение вакуумной камеры. С торцов она оканчивается фланцами из биметалла - сплав  $AM_4C$  + сталь I2X18H9T, выполненными сваркой взрывом.

Прямолинейные промежутки изготовлены из нержавеющей стали I2X18H9T. В каждом из них размещены магниторазрядный насос НМД-0,4 и испаритель титана, приемник излучения, электрод для обработки поверхности вакуумной камеры тлеющим разрядом. Для замыкания по ВЧ пролетного пространства промежутка устанавливается труба, повторяющая поперечное сечение вакуумной камеры, с перфорацией отверстиями  $\varnothing$  3 мм для откачки (рис.2).

Главным элементом впускного промежутка является импульсный впускной септум-магнит, причем его токоведущая наружная шина представляет собой "сэндвич", полученный методом сварки взрывом и состоящий из:

- 1) участка вакуумной камеры накопителя - сталь I2X18H9T;
- 2) магнитного экрана - железо АРМКО,
- 3) токоведущего участка шины - бронза БрХ-0,5;
- 4) участка вакуумной камеры впускного магнита - сталь I2X18H9T (рис.3).

Этот "сэндвич" через переходные фланцы приваривается к вакуумному объему впускного промежутка и к вакуумпроводу электронно-оптического канала.

Такая конструкция обеспечивает минимальную толщину "ножа" впускного магнита, хорошую экранировку "вываливающегося" импульсного поля и надежные вакуумные соединения.

Инфлекторы расположены в промежутке, аналогичном стандартному, а имитация продолжения сечения вакуумной камеры обеспечивается перфорированными инфлекторными пластинами специальной формы и дополнительными подвижными замыкателями, закорачивающими инфлекторные пластины после накопления пучка за время ускорения его до максимальной энергии, на которой и предполагается получать сгусток малой длины и малого эмиттанса.

Вакуумная система накопителя разделяется на отдельные участки пролетными высоковакуумными чистометаллическими шиберами (рис.4). В открытом состоянии пролетное отверстие в шибере повторяет поперечное сечение вакуумной камеры; заслонка шибера находится при этом в уплотненном состоянии для устранения паразитных мод ВЧ-колебаний.

Во время обезгаживания вакуумная камера накопителя откачивается специальными магниторазрядными насосами, отсекаемыми в стационарном режиме.

Измерение вакуума в накопителе будет осуществляться по току магниторазрядных насосов с выводом информации через ЭВМ.

## Л и т е р а т у р а

1. Ашпашин В.В., Вассерман И.Б. и др. Электрон-позитронный накопитель-охладитель БЭП. Настоящ. сборник, т.2, стр.238.

## ПРИМЕНЕНИЕ, 24-РАЗРЯДНОЙ МИКРО-ЭВМ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-4

А.Н.Алешаев, С.Д.Белов, Б.В.Левичев,  
Г.С.Пискунов, И.А.Протопопов, С.В.Тарарышкин

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Ускорители заряженных частиц являются чрезвычайно сложными и дорогими системами, рассчитанными на длительный срок эксплуатации: время жизни крупных ускорителей превышает 20 лет. В связи с этим остро встает проблема морального и физического старения основных компонентов системы управления и, что особенно важно, применяемых в системе ЭВМ. С этой проблемой приходится сталкиваться практически на всех ускорителях, построенных в 60-х - 70-х годах, и считаться с ней при строительстве новых /1/. Даже самая современная ЭВМ, заложенная в систему управления, за такой длительный срок безнадежно устаревает. Замена же управляющих машин сопряжена с очень большими затратами, так как при этом приходится заново разрабатывать большую часть всех средств сопряжения с экспериментальной аппаратурой, и, что более существенно, значительную часть программного обеспечения. Влияние этого обстоятельства на разработку проектов систем управления новыми ускорителями проявляется в том, что, с одной стороны, по возможности, до последнего момента оттягивается принятие решений по выбору средств вычислительной техники, а с другой стороны, предлагаются такие радикально новые концепции, как переход к полностью распределенным системам управления на базе применения высокопроизводительных микропроцессорных комплексов. Предполагается, что в этом случае функции отдельных узлов в распределенной системе существенно проще, чем в централизованной, и поэтому их модернизацию можно будет производить постепенно, по мере прогресса технологии, не нарушая целостности системы.

В период проектирования системы управления комплексом ВЭПП-4 ЭВМ ОДРА I325 - ОДРА I305 были выбраны как наиболее мощные из доступных в то время и, как показал опыт, этот выбор был правильным. В настоящее время выпуск машин этой серии фактически прекращен. Однако сейчас ясно, что комплекс ВЭПП-4 будет эксплуатироваться еще минимум 5-7 лет, и поэтому уже сейчас необходимо заниматься поисками путей дальнейшего развития и модернизации его системы управления. При этом видны следующие варианты расширения системы:

- увеличение парка управляющих машин путем добавления нескольких ЭВМ ОДРА-I305;
- переход на другие типы машин;
- расширение снизу и децентрализация системы за счет постановки микро-ЭВМ на периферии.

Ясно, что простое увеличение парка ЭВМ неприемлемо из-за того, что для существенного повышения вычислительного потенциала управляющего центра требуется непомерно большое количество машин, расширение площадей для их размещения и увеличение штатов обслуживающего персонала.

Что касается возможного перехода на другие типы машин, то на сегодняшний день единственно доступными являются ЭВМ типа СМ-4 или Электроника 100/25. Машин этого класса уже широко применяются как в ИЯФ, так и в ряде других организаций, и в работе с ними накоплен большой опыт. Однако, несмотря на значительные усилия, системы на базе этих машин еще не вышли на уровень требований, предъявляемых к системам управления большими установками. Кроме того, затраты на перевод существующего и разработку нового матобеспечения непомерно велики и для его осуществления требуется привлечение большого числа квалифицированных системных программистов. Главное, однако, состоит в том, что такой переход не дает качественного выигрыша в сравнении с существующим положением. ЭВМ типа ОДРА сравнимы по своим возможностям с ЭВМ класса СМ-4, а ряд удачных архитектурных решений делает их особенно привлекательными для применений в системах управления, где принципиально необходимо наличие эффективных средств мультипрограммирования.

Реальный выход видится в широком внедрении высокопроизводительных микро-ЭВМ на периферии, которые разгружали бы центральную машину от отдельных задач, с постепенным переходом к полностью распределенной системе управления.

Разработка автономного контроллера крейта ЦКК /2/ была, по существу, первым шагом в этом направлении. Этот контроллер, несмотря на свои существенные недостатки (малая емкость памяти, необходимость программирования на ассемблере), тем не менее, нашел применение на комплексе.

В случае применения на периферии микро-ЭВМ, программно совместимой с центральной, процесс децентрализации становится естественным и безболезненным, поскольку перенесение программы из центральной ЭВМ в периферийную требует минимальной ее модификации, либо не требует вообще.

В конце 1981 года была начата разработка автономного контроллера крейта, совместимого на уровне двоичных программ с машинами ОДРА, и к лету 1983 года была выпущена первая партия микро-ЭВМ, получивших название ОДРЕНОК. ОДРЕНОК представляет собой КАМАК модуль двойной ширины, устанавливаемый в контроллерную позицию крейта. Микро-ЭВМ выполнена на I30 ИС средней и большой степени интеграции, включая процессорные секции KI804BCI, с использованием техники микропрограммирования и является законченной ЭВМ, реализующей полный набор команд машин серии ОДРА-I300.

Особенности архитектуры и параметры контроллера:

- встроенная оперативная память - 64К 24-разрядных слов;
- среднее быстродействие - 200 - 300 тыс. операций в секунду;
- микропрограммная реализация операций с плавающей запятой;
- наличие аппаратных средств поддержки мультипрограммирования, включающих схему управления памятью, обеспечивающую перемещаемость программ и их взаимную защиту;
- наличие двух режимов (супервизор/задача);
- быстрое аппаратное сохранение и восстановление контекста при обслуживании программных и внешних прерываний;
- развит механизм экстракодов, обеспечивающий полную совместимость с ЭВМ ОДРА на уровне двоичных программ и дающий возможность использования всего ранее созданного системного обеспечения: текстовых редакторов, трансляторов, загрузчиков и т.п.;

-расширение системы команд ЭВМ ОДРА операциями для работы с КАМАКом: максимальная скорость обмена данными 300 тыс. 24-разрядных слов в секунду.

Наличие средств мультипрограммирования, традиционно рассматриваемых как принадлежность достаточно крупных машин, оказывается полезным и на уровне автономного контроллера крейта. Это связано с тем обстоятельством, что в географически распределенных системах управления аппаратура устанавливается в нескольких узлах, приближенных к установке, и в одном крейте могут оказаться модули, относящиеся к различным подсистемам. Каждую из таких подсистем проще обслуживать персональной программой, а параллельность выполнения программ и взаимодействие между ними обеспечивать средствами операционной системы.

На фортрановских задачах с использованием целочисленной арифметики производительность Одренка примерно в 8 раз превосходит производительность процессора Электроника-60 (МТ), а на задачах с интенсивным использованием арифметики с плавающей запятой примерно соответствует производительности ЭВМ класса СМ-4.

Связь с ЭВМ верхнего уровня осуществляется с помощью отдельного интерфейсного модуля (ИМ), устанавливаемого в любую позицию крейта. Этот модуль обслуживается микропрограммой контроллера с использованием стандартных NAF-ов и обеспечивает прямой доступ к памяти и регистрам контроллера, а также средства для дистанционной диагностики и отладки программ.

При использовании Одренка в автономном однопрограммном режиме (в качестве интеллектуального контроллера крейта) практически не потребовалось разработки дополнительного системного обеспечения. Для использования его в качестве "полноценной" многопрограммной ЭВМ потребовалась разработка небольшой операционной системы, функционально подобной применяемой на ЭВМ ОДРА. Эта ОС позволяет программам, работающим в Одренке, обращаться к внешним устройствам ЭВМ верхнего уровня, в том числе к дискам, терминалам и т.д. Она также обеспечивает межпрограммное взаимодействие как в самом Одренке, так и программ Одренка с программами в Одре. Отдельный интерфейсный модуль (ИМ) позволяет подключить непосредственно к данному крейту еще до 4 терминалов. ОС также обслуживает ряд модулей, расширяющих возможности системы: ЗУ емкостью 128К 24-разрядных слов, которое может использоваться в качестве локального "диска": интерфейсный модуль "КАМАК - последовательная система связи Одрн", через который можно подключать любые устройства системы управления, ранее подключавшиеся к Одре.

В настоящее время около 30 контроллеров активно используется в ИЯФ на многих установках. Можно выделить 4 основных варианта их применения:

- интеллектуальный "прибор", собираемый из стандартных модулей в одном крейте и решающий локальную задачу, включающую измерения, обработку и визуализацию (например, система измерения светимости на ВЭПП-4);
- автономная ЭВМ в составе стенда для наладки и диагностики аппаратуры или систем (например, рабочее место разработчика), либо в качестве мощной персональной ЭВМ;
- в составе систем регистрации в качестве быстрого буферного процессора (например, лазерный измеритель степени поляризации пучков в ВЭПП-4: скорость счета более 10 кГц);
- в качестве узла сети распределенной системы управления.

Рассмотрим одну из подсистем комплекса на основе Одренка, входящую в состав системы управления накопителем ВЭПП-3. В контроллере под управлением ОС работают две программы, прежде работавшие в центральной ЭВМ. Одна из них управляет системой измерения бетатронных частот накопителя, обрабатывает результаты, передает их по каналу межпрограммного обмена в центральную ЭВМ и отображает на цветном графическом дисплее. Вторая программа служит для отображения на другом цветном дисплее предыстории и текущего состояния накопителя. При этом используется информация, получаемая по межпрограммному обмену из центральной ЭВМ. Перенесение этих программ в контроллер заняло примерно один день. При переносе оказалось возможным существенно расширить функции программ и заметно разгрузить центральную ЭВМ.

Незначительность затрат на интеграцию описываемых контроллеров в состав существующих систем управления подтвердила правильность концепций, заложенных в основу разработки. В настоящее время считается, что дальнейшее развитие и модернизация системы управления ВЭПП-4 будет базироваться на широком применении этой микро-ЭВМ.

#### Л и т е р а т у р а

1. M.C. Crowley-Milling The multi-microprocessor assembly for LEP, CERN LEP-DI/83-55, Geneva, 1983.
2. Казаков А.А., Киселев В.А., Купер Э.А., и др. Автономная система наблюдения пучков заряженных частиц на основе микроканальных датчиков. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Т. II. с.339, ОИЯИ, Дубна, 1983.



ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ

Б.Ф.Баянов, Т.А.Всеволожская, Ю.Н.Петров, Г.И.Сильвестров

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Преимущество литиевых линз перед другими оптическими системами для фокусировки вторичных частиц высоких энергий, показанное на многих примерах /1,2,3/, приводит ко все большему расширению круга задач, при решении которых предполагается применение подобных устройств. Используя опыт ИЯФ в разработке таких систем, к созданию литиевых линз в последнее время приступили лаборатории FNAL и CERN. Линза FNAL с диаметром 2 см /4/, близко повторяющая конструктивный вариант ИЯФ /5/, изготовлена в 1983 году и испытана на антипротонной мишенной станции CERN /6/. Одной из основных задач дальнейшего развития таких систем является создание линз с апертурой 2+5 см, существенно большей, чем в ранее разработанных конструкциях. Проведенное рассмотрение режимов теплоотвода /7/ и исследование механических напряжений от теплового расширения лития /5/ показывают, что при создании линз большого диаметра нерационально идти путем простого увеличения масштаба, сохраняя ранее разработанную конструктивную схему. В этих конструкциях теплоотвод из рабочего объема линзы осуществляется через тонкую титановую оболочку, ограничивающую литиевый цилиндр с током, наружная поверхность которой обтекается водой. Время теплоотвода в зависимости от толщины оболочки  $\Delta$  и ее радиуса  $R$  может быть оценено как  $\tau \approx \frac{R\Delta(c\gamma)Li}{\lambda T}$ , где  $c$ ,  $\gamma$  и  $\lambda$  соответственно теплоемкость, плотность и теплопроводность лития и титана. В то же время, максимальное механическое напряжение в стенке оболочки, служащее ограничением допустимого поля в линзе, определяется отношением  $\Delta/R$ , а именно /5/:

$$\sigma = \frac{\alpha T}{\frac{\Delta}{R} \chi Li \frac{V_0}{V_p} + \frac{2}{E T_i}}$$

где  $T$  - температура нагрева лития за импульс,  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения лития,  $\chi$  - его сжимаемость,  $E$  - модуль упругости титана,  $V_0$  - полный объем лития в линзе,  $V_p$  - его рабочая, нагреваемая, часть. Необходимость сохранения величины  $\sigma$  при увеличении радиуса линзы приводит, таким образом, к увеличению времени теплоотвода, пропорциональному  $R^2$ , что служит ограничением применимости таких конструкций при больших  $R$ . Существенное снижение механических напряжений в стенке центральной трубки и соответствующее уменьшение ее толщины  $\Delta$  могло бы быть достигнуто при увеличении отношения  $V_0/V_p$ , т.е. создании значительного "буферного" объема лития, принимающего на себя тепловое расширение его рабочей части. Ограничением на этом пути служит большое, в десятки секунд, время релаксации пластической деформации в твердом литии /5/. При сравнительно малом ( $\sim 2$  с) времени охлаждения это приводит к понижению давления в рабочей части линзы после её остывания ниже начального уровня  $P_0$ , что при повторении импульсов тока с интервалом, много меньшим времени релаксации, может привести к образованию полостей в рабочем объеме лития и нарушению режима работы линзы.

Кардинальным изменением режима работы линзы является переход к конструкциям, работающим с жидким литием, прокачиваемым через рабочий объем линзы и теплообменник. Частота следования импульсов в этом случае будет определяться только временем обмена лития в линзе, т.е. не иметь принципиальных ограничений. При этом амплитуда импульсов давления от теплового расширения существен-

но уменьшится как за счет увеличения сжимаемости жидкого лития, так и за счет возможности использования значительного "буферного" объема при временах релаксации, определяемых только временем распространения звука в системе.

Разработка линз с жидким литием потребовала пересмотра их конструкции - устранения уплотняемых соединений в литиевом объеме для обеспечения надежной его герметизации. В новом варианте линза представляет собой цельносварную конструкцию из титана, существенно упрощившуюся из-за отсутствия системы водяного охлаждения (рис.1). Толщина стенки центральной трубки, которая в прежнем варианте определяла время охлаждения лития, теперь ограничивается только допустимым шунтированием тока, текущего через линзу, и для повышения надежности может быть увеличена ценой небольшого усложнения импульсного генератора. Основными деталями линзы являются центральная трубка (1), два приваренных к ней на торцах двухстенных токоподводящих цилиндра (2) и два торцевых фланца (3) с бериллиевыми вкладышами (4), отделенными от лития миллиметровой стенкой титана. Жидкий литий вводится в линзу по трубкам (5), проходящим через торцевые фланцы в полости токоподводящих цилиндров. Эксперименты с жидким литием проводились на линзе с апертурой 3 см толщиной стенки внутренней трубки 3 мм и ее длиной 14 см. Торцевые фланцы были цельнотитановыми без бериллиевых вкладышей, и для упрощения их изготовления трубки подвода лития размещались на их оси. Через одну из этих трубок в центр линзы вводилась термопара.

Аппаратура для прокачки лития включает в себя электромагнитный насос, теплообменник, систему контроля и регулировки давления в литии, электромагнитный расходомер и систему подогрева и термоконтроля (рис.2). При рассмотрении нескольких вариантов электромагнитных насосов мы остановились на насосе кондуктивного типа, как наиболее простом для обеспечения расхода лития в несколько литров в минуту при давлении порядка одной атмосферы. Насос представляет собой трансформатор с разомкнутым магнитопроводом, в зазоре которого сделана цилиндрическая расточка, куда вставлена титановая трубка диаметром 25 мм и толщиной стенки 1,5 мм, заполненная литием. Магнитопровод охвачен широким незамкнутым медным витком, который в пределах магнитопровода замыкается путем соединения с боковыми поверхностями трубки, выступающими из зазора, так что наводимая в витке ЭДС создает в литии ток, перпендикулярный магнитному полю с линейно нарастающей вдоль витка плотностью. Первый вариант насоса был выполнен на стандартном трансформаторном железе сечением  $25 \times 40 \text{ мм}^2$  и имел первичную обмотку из ста витков, запитываемых током до 30 А промышленной частоты 50 Гц. Исследования насоса - измерение его параметров и калибровка расходомеров, производились на галлий-индиевом сплаве со свободным сливом металла в открытый объем. При токе в первичной обмотке ~ 30 А насос обеспечивал расход металла ~ 1 л/мин и создавал давление ~ 1 атм.

Важным элементом системы при работе с жидким литием в замкнутом контуре является устройство для контроля статического давления в литии и его регулировки для устранения возможности возникновения пустот, опасных при работе линзы. Оно представляет собой нержавеющей силфон с приваренным дном, заполненный литием и соединенный с системой. Силфон помещается в герметичный цилиндр с трансформаторным маслом, соединенный в свою очередь тонкой трубкой с манометром и поршневым насосом. Перемещение поршня регулирует давление в масле и соответственно в жидком металле. Электромагнитный расходомер имеет очень простую конструкцию: полюса самарий-кобальтового магнита, создающего в зазоре поле 6 кЭ, накладываются на нержавеющей соединительную трубку (внутренний диаметр 7 мм, толщина стенки 1,5 мм), пережатую на длине ~ 3 см до получения внутреннего сечения  $9 \times 1,5 \text{ мм}^2$ . Потенциал, снимаемый со стенок трубки при движении жид-

кого металла со скоростью 1 м/с составляет 40 МВ. Линза соединяется с системой нержавеющей трубок с внешним диаметром 10 мм при внутреннем 7 мм. Все стыки элементов системы с соединительными трубками осуществляются посредством металлических конусных уплотнений, выполненных по нормалам швейцарской фирмы *Telacto*, показавших высокую надежность в эксплуатации.

Заправка системы литьем производится после ее вакуумной откачки и разогрева до температуры 200+250°C. Расплавленный в вакууме литий из специального объема продавливается через систему аргоном, подаваемым в объем под давлением. По мере остывания системы и затвердевания лития в ней после снятия подогрева давление в аргоне повышается до 20+30 атм. После отсоединения объема система замыкается в герметизированный контур, заполненный литьем. Полный объем лития в системе составляет ~500 см<sup>3</sup>.

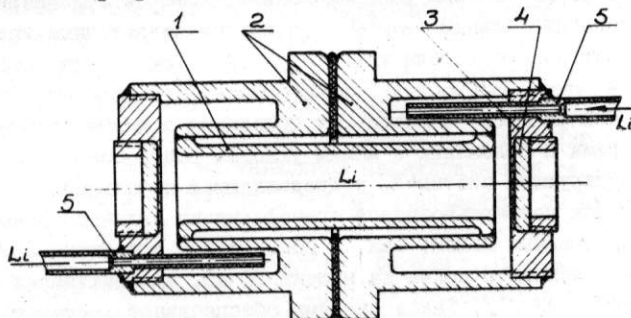
Перед началом работы весь контур снова разогревается до тех пор, пока литий не расплавится во всех его частях. При этом разогрев насоса до температуры более 200°C происходит за счет активных потерь в первичной обмотке и вторичном витке, не требуя специального подогрева; линза прогревается рабочими импульсами тока пониженной амплитуды при повышенной частоте следования; прогрев соединительных трубок осуществляется пропусканием через них тока промышленной частоты величиной 200+300 А, и только некоторые элементы системы, в частности, сифонный узел с масляным цилиндром имеет специальные подогреватели. Плавление лития во всем контуре определяется по показаниям расходомера, фиксирующего начало работы насоса, и по установлению равномерного распределения температуры на уровне 220+230°C. Давление лития поддерживается на уровне ~20 атм.

Испытания жидколитиевой линзы диаметром 3 см производились на установке, позволяющей запитывать ее импульсами тока амплитудой до 500 кА при длительности импульса 1 мс, соответствующей отношению скин-слоя к радиусу  $\delta/r_0 \sim 0,7$  при сопротивлении жидкого лития  $\rho = 3 \cdot 10^{-5}$  Ом·см. Помимо отработки технологических вопросов, связанных с использованием жидкого лития, основной задачей экспериментов было испытание работоспособности элементов системы под действием гидравлических ударов в жидком литии от магнитного поля и импульсного нагрева рабочей части линзы. При подъеме поля до 65 кЭ ( $\dot{J} = 500$  кА) броски давления в масляном манометре, соединенном с литиевой системой трубкой с внутренним диаметром  $\varnothing$  2 мм и длиной 3 м, составляли 30+40 атм над уровнем статического давления 20 атм. В процессе испытаний наиболее уязвимым элементом оказалась камера насоса, расположенная на расстоянии ~30 см от линзы (рис. 2) и соединенная с ней прямой трубкой с внутренним диаметром 7 мм (в этих экспериментах теплообменник был заменен прямой трубкой), которая, по-видимому неудачно, вводилась в линзу по оси в месте максимума магнитного давления на торце, составляющем при  $H = 65$  кЭ  $P = 170$  атм. В результате цилиндрическая камера насоса треснула по линии соединения ее с медным витком, которое было выполнено методом диффузионной сварки, и около 10 см<sup>3</sup> жидкого лития вышеснулось из системы. Введение трубок в полости токопроводящих цилиндров в рабочем варианте линзы одновременно с отнесением насоса на несколько метров от линзы за радиационную защиту, что приведет к демпфированию импульсов давления, должно дать существенное снижение его амплитуды в насосе. Кроме того, для повышения прочности камеры должно быть внесено изменение в ее конструкцию — локальное утолщение стенки в месте сварки с медным витком, где, по-видимому, происходит электрохимическая эрозия титана в жидком литии. После доработок ресурсные испытания системы будут продолжены.



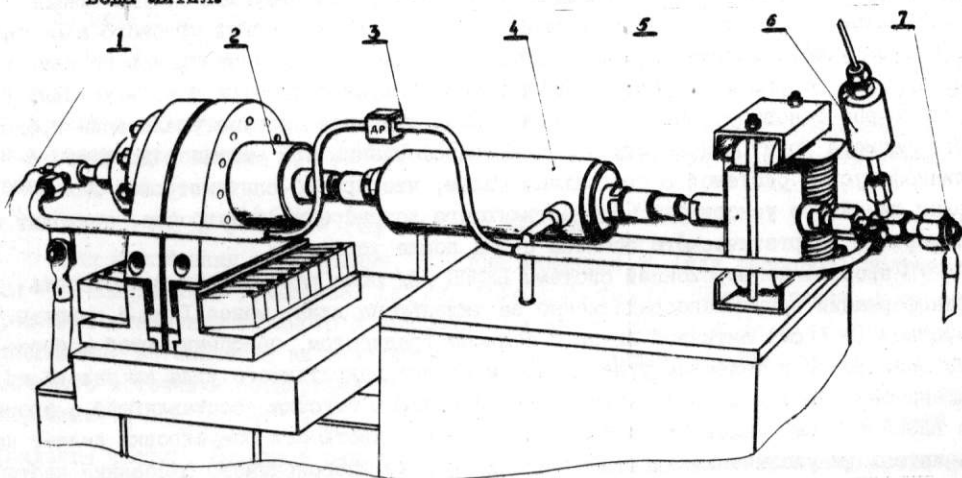
## Л и т е р а т у р а

1. Всеволожская Т.А. NIM, vol.190 (1981), No.3, p.479-486.
2. Hojvat S., Van Ginneken. NIM, vol.206 (1983), No.1, p.67.
3. Гаркуша В.Н. и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1978 г., т.2, стр.162.
4. Dugan G. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., vol.NS-30, No.4, p.3666 (Ag.1983).
5. Bayanov V.F. et al. Proc.of the XII Int.Conf.on High Energy Acc. FNAL, August 11-16, 1983, p.585.
6. Johnson C. PS/AA/ME/Note 72, October 1983.
7. Всеволожская Т.А., Сильвестров Г.Н. Тепловой режим цилиндрических литиевых линз. Препринт ИЯФ 84-100, Новосибирск, 1984 г.



Р и с. 1. Поперечное сечение линзы с жидким литием.

1 - внутренний титановый цилиндр, 2 - токоподводящие цилиндры, 3 - торцевые фланцы, 4 - бериллиевые вкладки, 5 - трубка подвода лития.



Р и с. 2. Цилиндрическая линза с системой прокачки жидкого лития. 1 - вывод термопары, 2 - линза с токоподводами и согласующим трансформатором, 3 - расходомер, 4 - теплообменник, 5 - насос, 6 - устройство контроля давления в литии, 7 - подводы тока для прогрева соединительных трубок.

□

МНОГОТЕРЦЕВЫЕ КОНУСНЫЕ ЛИНЗЫ С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ  
ПОЗИТРОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Б.Ф.Баянов, Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов, Г.И.Сильвестров

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В настоящее время наиболее распространенным способом получения интенсивных позитронных пучков является преобразование электронов с энергией в несколько сотен МэВ в позитроны низкой энергии, соответствующей максимуму их полного выхода из мишени, с последующим доускорением их в линейном ускорителе с сопровождающим продольным магнитным полем на начальном этапе ускорения. Этот способ характеризуется большим энергетическим интервалом собираемого с мишени позитронного пучка и его широким угловым распределением, которое при энергиях ниже 10 МэВ становится пропорциональным  $\cos^2\theta$  со среднеквадратичным углом  $\sim \pm 0,6$  рад и размером позитронного источника  $\sqrt{\langle r_0^2 \rangle} \pm 0,1$  см. Задача собирания такого пучка состоит в четвертьволновой трансформации его поперечного эмитанса, т.е. в преобразовании его фазового эллипса, от положения с малым координатным и большим угловым размерами к положению с малым угловым разбросом для согласования с параксиальной фокусирующей системой, сопровождающей начальный этап ускорения.

Общепринятым для четвертьволновой трансформации является применение соленоида с сильным продольным полем. Так, в позитронном источнике SLAC для этой цели используется соленоид с полем на мишени 20 кЭ, адиабатически спадающем до 2 кЭ на расстоянии 75 см /1/. Такая система обеспечивает достаточно высокий коэффициент собирания позитронов ( $K = 0,83\%$  при  $E^- = 250$  МэВ), составляющий, однако, еще малую долю от коэффициента выхода их в захватываемом интервале энергий, что определяется двумя факторами. Во-первых, угловой аксептанс даже такой сильной фокусирующей системы чрезвычайно мал по сравнению с углами выхода позитронов при этих энергиях, что хорошо демонстрируется рисунком 1, где кривые 1 и 2, взятые из работы /1/, показывают зависимость от энергии углового аксептанса фокусирующей системы SLAC, кривая 3 — углы выхода позитронов по данным работы /2/. Вторым фактором, ограничивающим захват больших углов, в которых сосредоточено основное количество позитронов, является быстрое увеличение продольного размера позитронного сгустка при трансформации его эмитанса достаточно длиннофокусной системой с продольным полем, что при 10-сантиметровой длине волны линейного ускорителя, осуществляющего доускорение позитронов, приводит к расширению энергетического спектра пучка после ускорения.

В проекте конверсионной системы ВЛЭШ /3/ была рассмотрена возможность трансформации пучка непосредственно за мишенью на длине менее 1 см с помощью короткой ( $\sim 1$  см) литиевой линзы с большим градиентом, обеспечивающей собирание позитронов в телесном угле, большем среднеквадратичного угла их выхода из мишени без заметного увеличения продольной длины сгустка, составляющей в проекте ВЛЭШ  $\sim 1$  см. Малая длина линзы при высокой жесткости фокусировки делает незначительным увеличение эмитанса пучка за счет многократного рассеяния частиц в веществе линзы. Так, линза с градиентом поля  $\frac{dH}{dr} = 100$  кЭ/см, расположенная за мишенью, обеспечивает четвертьволновую трансформацию пучка частиц с энергией  $E = 10$  МэВ на длине  $l = 0,9$  см с фокусным расстоянием  $F = 1/\sqrt{k} = 0,58$  см ( $k = \frac{dH}{dr} \cdot \frac{300}{E}$ ). Угол многократного рассеяния частиц в линзе составит  $\sqrt{\langle \theta_p^2 \rangle} = 0,11$  рад, в то время как фазовые углы в пучке на выходе линзы  $\theta_\phi = r_0/F$  при радиусе пятна на конвертере  $r_0 = 1$  мм составляют  $\theta_\phi = 0,17$  рад, так что увеличение эмитанса пучка за счет квадратичного сложения этих углов не превышает 20%. Суммарный угловой разброс на выходе линзы,  $\theta \cong 0,2$  рад, обеспечивает

возможность дальнейшего преобразования пучка оптическими системами с продольным полем.

Энергетический интервал частиц, собираемых линзой, можно характеризовать интервалом, в котором дисперсия угла поворота траектории в линзе за счет  $\Delta E \neq 0$  не превосходит фазовых углов. При диаметре линзы 1 см, обеспечивающем собирание частиц в линейном угле  $\sim 0,7$  рад,  $\frac{\Delta E}{E}$  составляет  $\sim \pm 30\%$ . Поле на поверхности линзы при такой апертуре составляет 50 кЭ.

Анализ оптических свойств линзы показывает /4/, что аберрационные углы при рассматриваемых параметрах значительно меньше фазовых углов и углов рассеяния и практически не дают прироста эффективного эмиттанта пучка. В частности, сферическая аберрация при угле собирания  $\sim 0,7$  дает угол  $\sqrt{\langle \alpha_{2s}^2 \rangle} \cong 6 \cdot 10^{-2}$  рад. Краевые эффекты в различных геометриях при диаметре линзы, равном ее длине, изучались на жидкометаллических моделях увеличенного масштаба из галлий-индиевого сплава, позволяющих измерить распределение поля во всем объеме линзы в адекватных рабочих условиях. Обработка результатов измерений (рис.2) дает угол краевой аберрации, меньший  $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  рад во всех рассмотренных геометриях.

Большой угол собирания частиц при малом по сравнению с диаметром линзы размере источника делает неоптимальной цилиндрическую геометрию линзы, поскольку значительная часть ее рабочего объема оказывается за пределами огибающей пучка. Более эффективной является линза, имеющая форму усеченного конуса с отношением выходного радиуса ко входному, равным  $r_2/r_1 \sim 2+3$ . В такой линзе поле уменьшается вдоль оси линейно с продольной координатой поверхности линзы и квадратично - на фиксированном радиусе, т.е. градиент поля зависит от  $z$  как  $K = K_0/(1+\alpha z)^2$ , где  $\alpha$  - константа в уравнении образующей конической поверхности линзы  $r = r_1(1+\alpha z)$ . Траектория движения частицы в линзе описывается уравнением  $\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{K_0 r}{(1+\alpha z)^2} = 0$ , решение которого имеет вид  $r(z) = \sqrt{1+\alpha z} [A \sin \varphi + B \cos \varphi]$ ,

где  $\varphi = \varphi(z) = \gamma \ln(1+\alpha z)$  с постоянной  $\gamma = \sqrt{(\frac{K_0^2}{\alpha^2} - \frac{1}{4})}$ . Определяя константы A и B из начальных условий  $r(0) = r_0$ ,  $dr/dz|_{z=0} = \theta_0$ , получаем  $r = \sqrt{1+\alpha z} [\frac{\theta_0}{\alpha \gamma} \sin \varphi + r_0 (\cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{2\gamma})]$ ,  $\frac{dr}{dz} = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha z}} [\theta_0 \cos \varphi + 2\theta_0 \frac{-\alpha r_0 (1+4\gamma^2) \sin \varphi}{4\gamma}]$ . Условием четвертьволновой трансформации является равенство нулю выходных углов частиц из точечного источника  $dr/dz|_{r_0=0, z=z_0} = 0$ , которое определяет фокусное расстояние линзы  $F_0 = \sqrt{\frac{1+\alpha z_0}{K}}$  и выходные значения координат и углов при всех  $r_0 \neq 0$ :

$$r_{fin} = \sqrt{\frac{1+\alpha z_0}{K_0}} (\theta_0 - \alpha r_0), \quad \theta_{fin} = \frac{-r_0 \sqrt{K_0}}{\sqrt{1+\alpha z_0}}$$

Для нахождения длины линзы  $z_0$  при заданном  $\gamma$  (или наоборот) получается трансцендентное уравнение  $\text{tg}[\gamma \ln(1+\alpha z_0)] + 2\gamma = 0$ . Произведение  $\alpha z_0$  определяет отношение входного и выходного радиусов конуса  $r_1/r_2 = 1/\sqrt{1+\alpha z_0}$ , абсолютные же значения их находятся из условия касания крайней траектории из точечного источника образующей конуса. Для входного радиуса при этом получаем выражение  $r_1 = \theta_{0max} e^{-\frac{1}{2\gamma}(\pi - \frac{1}{\delta})/\sqrt{K_0}}$ , где  $\theta_{0max}$  - максимальный из собираемых углов рождения частиц. Выходной радиус линзы превышает выходную координату крайней частицы в отношении  $\frac{r_2}{r_{fin}(\theta_{0max})} = \exp(\frac{1}{2\gamma}z)$ , что определяет также и отношение выходного радиуса конусной линзы к радиусу цилиндрической  $r_{cy}$  при одинаковых фокусных расстояниях  $F_k = F_{cy}$ , поскольку у цилиндрической линзы  $r_{cy} = r_{fin}(\theta_{0max})$ .

Основное преимущество конусной линзы перед цилиндрической состоит в уменьшении питающего тока при тех же угле собирания и фокусном расстоянии. Градиент поля  $K_0$  и плотность тока на входе конусной линзы в  $1+\alpha z_0$  раз больше, чем у цилиндрической, входной же радиус  $r_1$  меньше  $r_{cy}$  в отношении  $\exp(\frac{1}{2\gamma}z)/(1+\alpha z_0)$ , так что отношение токов  $\frac{J_k}{J_{cy}} = \frac{e^{1/\gamma^2}}{1+\alpha z_0}$  оказывается меньшим единицы. При  $\alpha z_0$

в диапазоне от 1 до 3,5 выигрывает в токе составляет от 1,7 до 2,5 раз. Длины линз относятся как  $\frac{z_{ок}}{z_{оу}} = \frac{2\alpha z_0}{\pi} \sqrt{\frac{Y^2 + \frac{1}{4}}{1 + \alpha z_0}}$ , активные сопротивления  $-\frac{R_k}{R_u} = (1 + \alpha z_0) e^{-Y^2}$ , мощности активных потерь  $-P_k/P_u = \frac{e^{1/8^2}}{1 + \alpha z_0}$ . Следует также отметить пропорциональное  $e^{1/8^2}/(1 + \alpha z_0)^2$  уменьшение давления на выходной фланец линзы, что позволяет уменьшить толщину фланца и тем скомпенсировать некоторое увеличение длины линзы и угла рассеяния в ней.

Частота срабатываний линзы для проекта ВЛЭШ составляет 10 Гц, однако, для расширения возможности применения литиевых линз в позитронных источниках линейных ускорителей мы остановились на варианте линзы, способной работать на частотах до 100-200 Гц. Задача теплоотвода в этом варианте линзы решается путем использования в качестве проводника тока жидкого лития, прокачиваемого через систему. В рассматриваемой геометрии это позволяет одновременно решить и задачу отвода тепла от конвертера, помещаемого на входном фланце линзы.

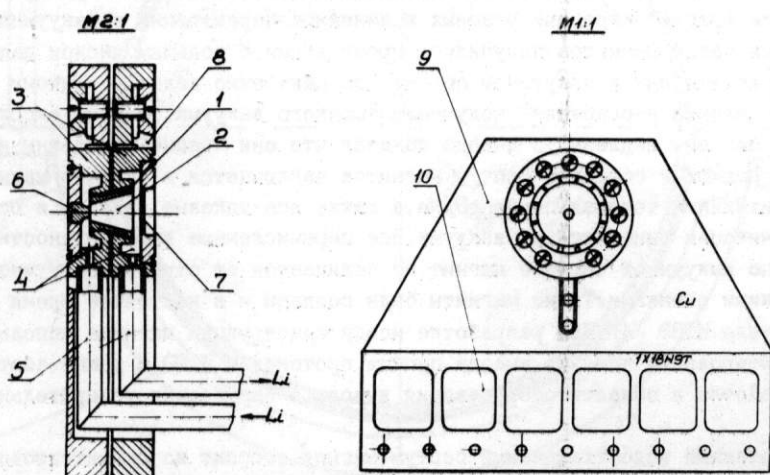
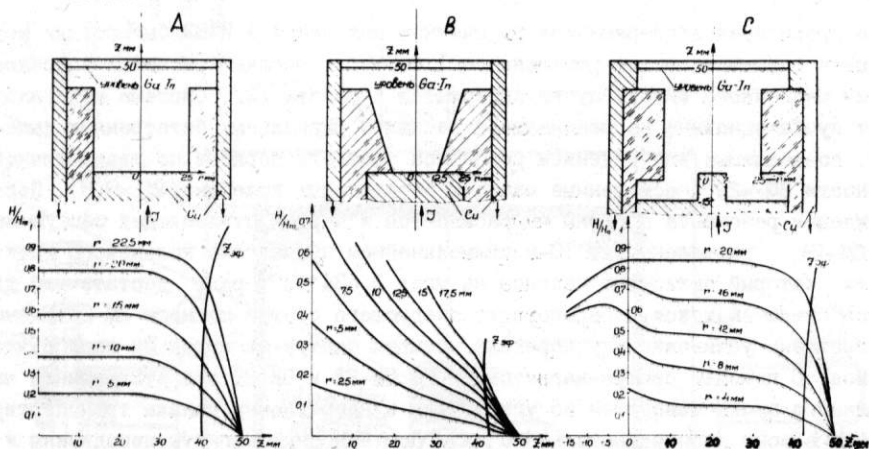
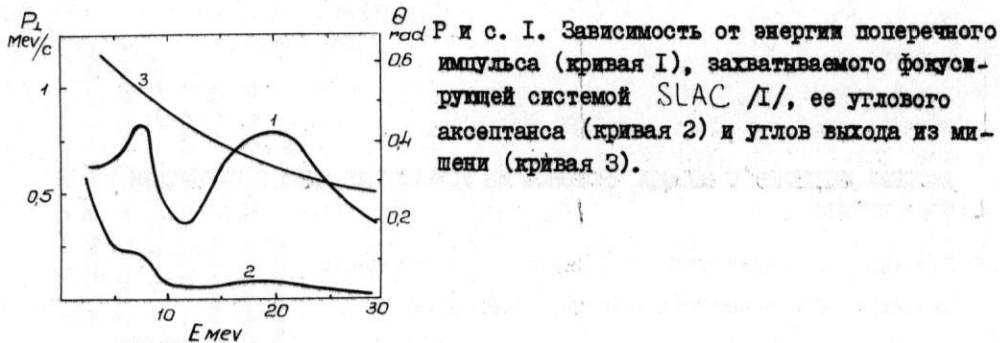
Для отвода мощности в несколько киловатт, выделяемой в линзе и в мишени в объеме порядка 1 см<sup>3</sup>, необходим расход лития в несколько литров в минуту, что достигается с помощью достаточно простого электромагнитного насоса. Схематический чертеж макета линзы, на котором производилось исследование теплоотвода и отработка технологии работы с жидким литием, приведен на рис.3. Линза представляет собой цельносварную конструкцию из титана с тонкостенной внутренней трубкой цилиндрической или конической формы (1), ограничивающей рабочий объем лития (2), и цилиндрическими токоподводами (3), к внутренним полостям которых (4) подводится жидкий литий по трубкам (5) с внутренним диаметром ~ 4 мм. На входном фланце линзы закреплена цилиндрическая мишень из вольфрама (6), омываемая жидким литием, на выходном торце приварен титановый фланец (7), имеющий в пределах апертуры толщину 0,3 мм. Посредством цапговых контактов (8) линза крепится в плоских токоподводах (9), соединяющих ее через тепловые развязки (10) с согласующим трансформатором. Система прокачки лития, соединенная с линзой трубками (5), включает в себя электромагнитный насос кондуктивного типа, теплообменник, электромагнитный расходомер, устройство для контроля и регулировки давления в литии, систему термоконтроля и штуцера для вакуумирования и заправки лития. Подробно элементы жидколитиевой системы описаны в работе /5/.

Методические эксперименты производились с линзой цилиндрической формы диаметром 8 мм и длиной 1 см, которая при токе 50 кА по мощности энерговыделения аналогична конусной линзе с  $\alpha z_0 = 1,5$  и  $F = 0,52$  см, рассчитанной на собирание позитронов с энергией 7 МэВ. Линза запитывалась импульсами тока длительностью 100 мкс и частотой следования 100 Гц. Температура в центре линзы контролировалась термопарой, вводимой через входной фланец линзы. При токе 50 кА мощность, выделяемая в линзе составляла ~ 1 кВт и при расходе лития ~ 1 л/мин., температура в центре линзы повышалась на 30°. При этом подогрев с элементов литиевой системы снимался. Роль теплообменника играла поверхность системы, через которую рассеивалась мощность, выделяемая в линзе и в насосе.

В настоящее время в ИЯФ производится разработка литиевой линзы для позитронного источника линейного ускорителя ХФТИ с частотой следования импульсов 100 Гц для собирания позитронов в диапазоне энергий 4-10 МэВ.

#### Л и т е р а т у р а

1. M.V.James et al. A Calculation of Positron Source Yields. Proc.of the X Int. Conf. on High Energy Acc. Protvino, 1977, vol.2, p.148.
2. В.А.Тавровский. АЭ, 1977, т.42, стр.317.
3. A.D.Chernyakin et al.Proc. of the XII Int.Conf.on High En.Acc. FNAL,1983, p.131
4. Т.А.Всеволожская, М.А.Любимова, Г.И.Сильвестров. ЖТФ, т.45, вып.12,1975,с.294
5. Б.Ф.Баянов и др."Цилиндрические линзы большого диаметра с жидким литием". Наст.сборник т.1, стр.402.



## ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕМЕНТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ

Л.Л.Данилов, Г.И.Сильвестров, А.Д.Чернякин

Институт ядерной физики, Новосибирск

В.В.Корневский, Е.Б.Сугак

Московский инженерно-строительный институт им.В.В.Куйбышева

Проводимые в ИЯФ разработки элементов мишенных станций, предназначенных для работы с интенсивными протонными пучками  $\sim 10^{13}$  частиц в секунду, в частности, импульсных фокусирующих систем [1] и магнитов для сепарации [2] и развертки пучков [3], потребовали специального выбора радиационно-стойких изоляционных материалов, применяемых при создании высоковольтной импульсной аппаратуры, способных сохранять свои электрические и механические параметры в условиях набора дозы до сотен тысяч мегарад в год. Такие радиационные нагрузки на 2-3 порядка превышают допустимые дозы для традиционно применяемых в электротехнике изоляционных материалов на основе эпоксидных компаундов [4], очень удобных по своим технологическим свойствам для склейки, заливки и пропитки различных изделий. Широко применяемые нами при разработках радиационно-стойких высоковольтных конструкций керамика и электротехническая слюда, а также описанные в работе [2] многослойные изоляторы на основе фольг из алюминия, титана, тантала с изоляционными покрытиями, осуществляемыми методом микродугового оксидирования, обладая хорошими радиационными свойствами, не всегда применимы для изоляции больших поверхностей и геометрически сложных зазоров.

Перспективным материалом для этих целей являются неорганические вяжущие вещества, в частности, композиции на основе некоторых видов минеральных цементов. При хороших радиационной стойкости и электромеханических характеристиках, из цементных композиций благодаря их малой усадке при затвердевании возможно изготовление сложных по конфигурации объемов, омоноличивание тонких зазоров и труднодоступных мест. Указанные свойства позволили, например, применять цементную изоляцию в разработках радиационно-стойких постоянных магнитов для заливки межвитковых зазоров многовитковых обмоток [5].

Целью настоящей работы явилось исследование возможности использования цементного вяжущего для создания изоляции в импульсных дипольных магнитах с большими индукциями от 2 тесла и выше, спецификой которых, в отличие от постоянных магнитов с низким межвитковым напряжением и статическим механическим нагружением изоляции, является существенно более высокое электрическое напряжение на изоляционных зазорах (порядка 1 кВ и выше), динамический режим нагружения изоляции и необходимый ресурс в десятки миллионов циклов.

Исследования, выполненные на кафедре Строительства ядерных установок МИСИ им.В.В.Куйбышева [6] позволили выбрать для этой цели цементную композицию на белитоалюминатном цементе (цемент БАЦ) и тонкомолотом кварце. Белитоалюминатный цемент изготавливается из отходов производства и имеет невысокие строительные свойства, однако благодаря тому, что затвердевшее вяжущее состоит, в основном, из гелевидных соединений гидросиликатов кальция типа  $CaSH(8)$  и  $Ca_2SH_2$  и в нем отсутствуют кристаллы гидроокиси кальция  $Ca(OH)_2$ , оно обладает более

высокими диэлектрическими свойствами. К тому же цемент БАЦ в отличие от высокоглиноземистого цемента, рекомендуемого ЦЕРН для радиационно-стойких магнитов [5], не имеет усадки при твердении, обеспечивая тем самым более плотный и надежный контакт с поверхностями заливаемых зазоров. Последнее обстоятельство особенно важно для магнитов, работающих в импульсном режиме, так как при наличии даже незначительной полости после нескольких миллионов импульсов "сжатие-растяжение" эта неплотность приводит к растрескиванию изоляции и, в конечном счете, к разрушению. Что касается радиационной стойкости белитоалюминатного цемента, то она будет не ниже достаточно хорошо изученной радиационной стойкости портландцемента, к классу которого относится цемент БАЦ.

Для выбора оптимальных составов с высокими диэлектрическими и физико-механическими свойствами были исследованы двадцать пять композиций на цементе БАЦ и высокоглиноземистом цементе Талюм. Свойства наиболее перспективных композиций, определенные при нормальных условиях и без тепловой обработки после твердения смеси, представлены в таблице. Из экспериментальных данных следует, что диэлектрические свойства, определенные при нормальных условиях у композиций на цементе БАЦ значительно выше, чем у композиций на цементе Талюм. Содержание кварца в приготавливаемом растворе составляло 50% от массы цемента, тонкость его помола равнялась тонкости помола цемента. Сухие компоненты - цемент и кварц перемешивались, затем смесь затворялась водой в количестве 35%-40% от массы смеси и тщательно перемешивалась. Необходимой технологической операцией при изготовлении изделий со сложными изоляционными зазорами является их вибрация в процессе заполнения цементным раствором или его инъектирование под давлением. Магнит помещается на вибраторный стол и при его работе осуществляется заполнение зазоров цементным тестом через технологические отверстия. Испытания изделий начинались после затвердевания цементного раствора и набора им достаточной прочности в течение 2-4 месяцев.

Т а б л и ц а  
Свойства цементных композиций

Содержание кварца, % от массы цемента	Количество воды затворения, % от массы смеси цемента и кварца	Электрическая прочность кВ/см	Объемное электрическое сопротивление при 10 В, 10 <sup>10</sup> Ом.см:	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Динамический модуль упругости, МПа
Цемент белитоалюминатный БАЦ						
30	30	28,0	1,67	35,1	-	-
50	30	32,1	2,61	41,8	6,3	0,9 · 10 <sup>4</sup>
70	30	38,0	2,62	24,8	-	-
Цемент высокоглиноземистый Талюм						
30	32,5	16,7	1,38	67,6	-	-
50	32,5	17,8	1,07	76,2	-	-
70	32,5	18,5	1,23	72,6	-	-

Основным вопросом при разработке импульсных магнитов с большими индукциями является выбор конструктивной схемы, обеспечивающей его механическую прочность и оптимальные условия работы изоляции. Такие требования наилучшим образом выполняются в одновитковых конструкциях со сплошным формированием поля и шихтованным магнитопроводом, которые запитываются импульсами тока с длительностью в несколько миллисекунд. При расстоянии между параллельными шина-

ми, приблизительно равном половине зазора между шихтованными полосами, однородность поля в таком магните в центральной области с диаметром, равным расстоянию между шинами, ухудшается на 1-1,5% в процессе насыщения железа вплоть до индукций 5-7 тесла [7].

Выбранный нами вариант магнита является дальнейшим развитием конструктивной схемы с потенциальным магнитопроводом [2,7], в котором токовые шины жестко крепятся непосредственно на железе магнитопровода, оказывающимся под потенциалом шин и изолируемым от силового банджа по наружному контуру изоляционным зазором, заполняемым цементным раствором (позиция 1 на рис.1). При этом усилие расталкивания шин магнитным полем передается через магнитопровод на большую площадь изоляции, обеспечивая на ней минимальное удельное давление. Изоляция между двумя половинами магнитопровода в области апертуры осуществляется посредством тонкого зазора в 0,5-1 мм, в который свободно вставляется пластинка электротехнической слюды или оксидированные фольги, не испытывающая никаких механических нагрузок. С удалением от апертуры этот зазор увеличивается и переходит в широкую область, заполненную цементным раствором (позиция 2 на рис.1) и воспринимающую давление сжатия силового банджа. Условием правильной работы такой конструкции является обжатие ее банджом с силой, превышающей усилие расталкивания шин, что обеспечивает отсутствие усилий растяжения на цементную изоляцию в области (2). Наружный контур магнитопровода выполнен круглым, так что кольцевой бандж создает объемное статическое обжатие цементной изоляции во всех ее сечениях. В динамическом режиме нагружения статические и динамические напряжения в области (1) складываются, а в области (2) вычитаются, разгружая изоляцию, но не доводя до нуля напряжение ее предварительного сжатия, что обеспечивает отсутствие нежелательных для материала изоляции знакопеременных нагрузок в конструкции рис.1 или нераскрытие стыка в конструкции рис.2. Исследование напряженного состояния изоляционного слоя в выбранной геометрии проводилось на плоской модели магнита из прозрачных полимерных материалов методом фотоупругости на поляризационной установке БЩ-ИМАШ 120 [8].

Для исследования поведения цементной изоляции в режимах динамического нагружения была изготовлена силовая модель магнита длиной 270 мм с высотой шин 40 мм и малым расстоянием между ними для уменьшения энергоемкости системы (рис.1), в которой имитировалась реальная топография распределения напряжений в изоляции от расталкивания шин и статического обжатия. Изоляционный зазор толщиной 15 мм образовывался между магнитопроводом и тонкостенной трубой с двумя продольными разрезами в вертикальной плоскости симметрии, которая обжималась банджом, выполненным в виде двух полуколец, стягиваемых шпильками с усилием около 2 т/см длины магнита. Одновременно на этой модели отрабатывалась технология заполнения зазора цементным тестом на стандартном вибрационном столе. На торцах зазор закрывался асбоцементными кольцами, и заливка производилась при вертикальном расположении магнита на вибрационном столе через отверстия в области (2). Испытания были начаты через 4 месяца после заливки при поле между шинами 2,5 Т, и после каждого миллиона циклов поле повышалось до 3,75 Т, 4,25 Т и 5 Т. После трех миллионов циклов при поле 5 Т бандж был снят и наружная труба разрезана на две части в продольном направлении. При этом труба оказалась в хорошем сцеплении с цементом и после ее снятия на поверхности цемента не обнаружилось каких-либо заметных растрескиваний и разрушений. После повторной сборки испытания продолжались с подъемом поля до 7,5 Т (три тысячи циклов) и до 10 Т (одна тысяча циклов), после чего они были прекращены из-за разрушения токопроводов при токе более 400 кА.



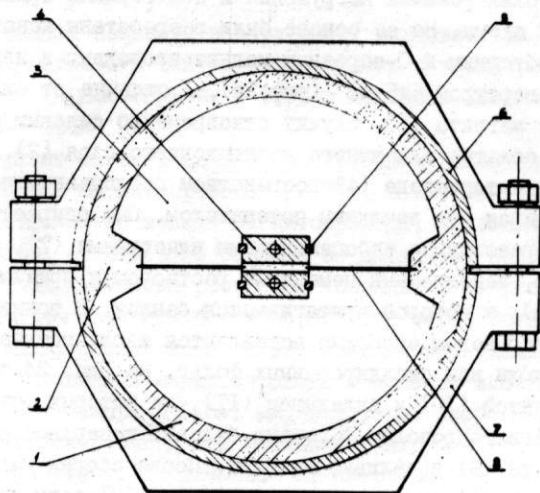
Проведенные испытания показали хорошие механические свойства цементной изоляции при динамических режимах нагружения и подтвердили правильность выбранной конструктивной схемы. На ее основе были разработаны конструкции двух типов магнитов с С-образным и 0-образным магнитопроводами и изготовлена модель первого из них с апертурой  $5 \times 5 \text{ см}^2$  (рис. 2а). В отличие от силовой модели, наружный кожух этого магнита (1) служит одновременно силовым бандажом, обеспечивающим объемное обжатие цементного изоляционного слоя (2). Внутренняя шина (3) крепится на магнитопроводе (4) посредством продольных шпонок (5); наружная шина (6) находится под земляным потенциалом. Она опирается на базовые поверхности (13), образованные асбоцементными пластинами (7), ограничивающими изоляционный зазор, заполненный цементным раствором, и прижимается к ним стальной пластиной (8), к которой притягивается бандаж. В тонкий зазор (9) между шиной и магнитопроводом свободно вставляются изоляционные пластины из электротехнической слюды или оксидированных фольг. На рис. 2б показаны магнит с технологической плитой (10) и вкладышем (11), на которых осуществляется сборка шихтованного магнитопровода, формовка базовых поверхностей (13) и тонкого изоляционного зазора (9) и заливка магнита. После сборки магнитопровода, пластины которого опираются на базовые поверхности (12) технологической плиты, на заниженную часть других ее базовых поверхностей (13) свободно укладываются куски асбоцемента или любого твердого диэлектрика (например, пластины мрамора или куски гранита), у которых обработана только нижняя поверхность, опирающаяся на базовую плоскость плиты. После надевания бандажа, опирающегося на поверхности (14) технологической плиты, осуществляется заполнение зазора цементным тестом при горизонтальном положении магнита на вибронном столе через отверстия (15). После набора прочности цементным раствором технологическая плита снимается и производится монтаж наружной шины (6).

При квадратной апертуре магнит рассчитан на работу при индукциях до 2Т, ограниченных насыщением железа и искажением топографии поля. С изменением геометрии шины (пунктир на рис. 2а) для получения апертуры  $25 \times 50 \text{ мм}^2$  с увеличенным вертикальным зазором магнит может использоваться для работы при индукциях до 5-7 Т. Силовые испытания модели магнита длиной 270 мм производились с шиной, создающей апертуру  $5 \times 50 \text{ мм}^2$ , для уменьшения энергоемкости и упрощения системы питания. При индукции 5Т и длительности импульса 1 мс к настоящему времени произведено миллион циклов и ресурсные испытания продолжаются.

Второй вариант магнита с 0-образным магнитопроводом (рис. 3а, б) имеет точно такую же конструкцию, но состоит из двух половин, симметричных относительно вертикальной плоскости, в которой располагается тонкий изоляционный слой между двумя частями магнитопровода. Каждая половина магнита изготавливается независимо по описанной выше технологии, после чего они собираются на технологическом вкладыше и штифтуется.

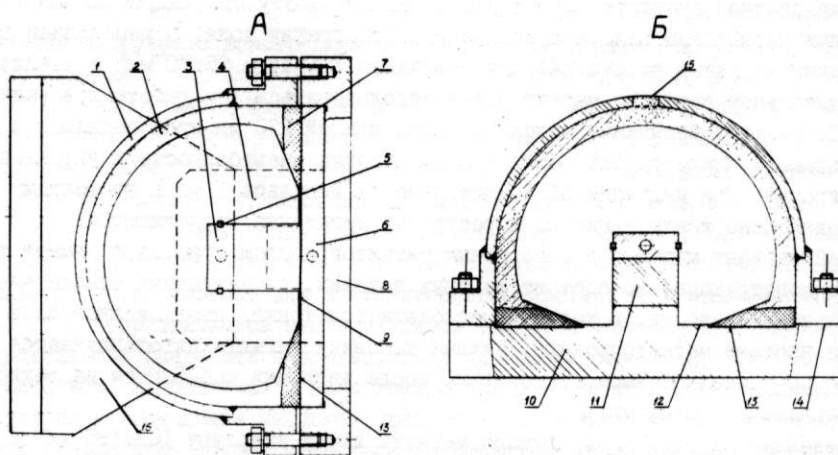
Приведенная на рис. 3 конструкция магнита имеет апертуру  $160 \times 180 \text{ мм}^2$  и длину 1,5 м. Магнит предназначен для сепарации вторичных частиц в нейтринной мишенной станции ИФВЭ при организации мононейтринных экспериментов с бустерной интенсивностью. Он рассчитан на работу при индукциях 1,5-2Т в зависимости от требований на однородность поля в апертуре.

В заключение отметим, что применение подобных конструкций импульсных магнитов с цементной изоляцией может оказаться также выгодным и в обычных системах транспортировки пучков, где нет специальных требований на радиационную стойкость, благодаря более простой и дешевой технологии заливки цементного раствора по сравнению с эпоксидными компаундами, требующими специального оборудования и сложной технологии заливки под давлением.



Р и с. 1. Поперечное сечение силовой модели.

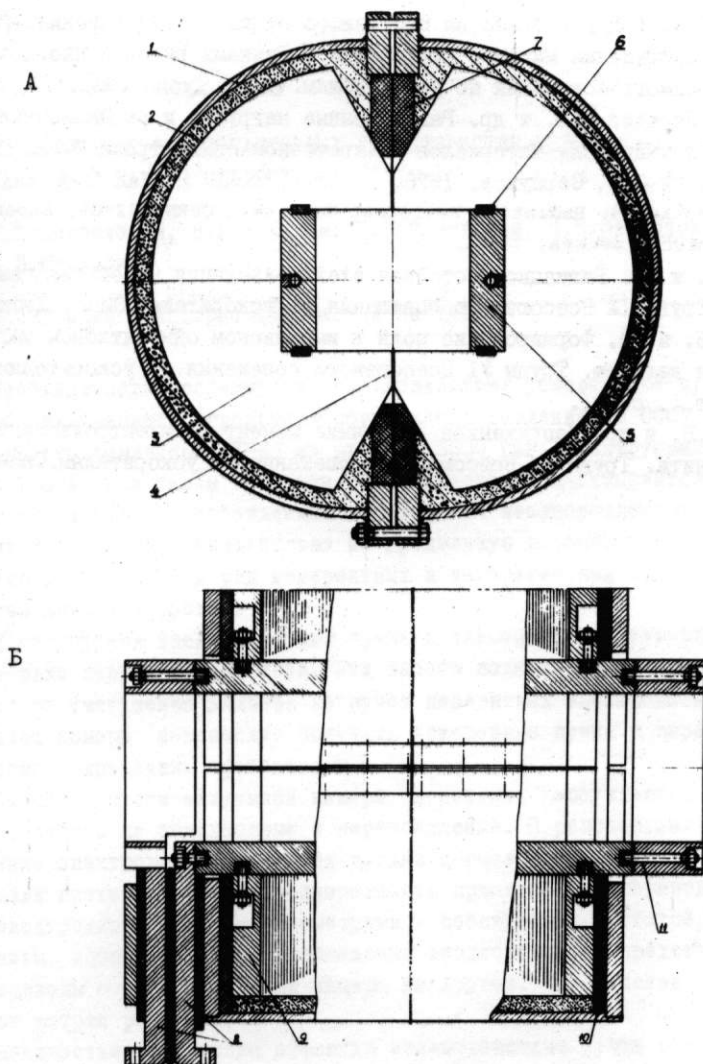
1 - цементная изоляция; 2 - часть цементной изоляции, разгружаемая под действием импульсной силы; 3 - шихтованный магнитопровод; 4 - токовые шины; 5 - шпонки; 6 - кожух; 7 - силовой бандаж; 8 - изоляционный зазор.



Р и с. 2. Конструкция магнита с С-образным магнитопроводом.

А - магнит, подготовленный к испытаниям; Б - магнит с технологической оснасткой для заливки.

1 - силовой корпус, 2 - цементная изоляция, 3 - внутренняя токовая шина, 4 - магнитопровод, 5 - шпонки, 6 - наружная токовая шина, 7 - базовые асбестоцементные вкладыши, 8 - прижимная плита, 9 - изоляционный зазор, 10 - базовая технологическая плита, 11 - технологический вкладыш фиксации магнитопровода, 12 - базовая поверхность магнитопровода, 13 - базовая поверхность изолятора, 14 - базовая поверхность корпуса, 15 - отверстие для заливки цементного раствора, 16 - токоподвод.



Р и с. 3. Конструкция магнита с 0-образным магнитопроводом -  
 А - поперечное сечение магнита, Б - продольный разрез магнита.  
 1 - силовой корпус, 2 - цементная изоляция, 3 - магнитопровод, 4 - изоляцион-  
 ный зазор, 5 - токовые шины, 6 - клиновые шпонки фиксации шины, 7 - базовые  
 изоляторы из асбоцемента, 8 - плоские токоподводы, 9 - торцевые щеки фиксации  
 магнитопровода, 10 - торцевые изоляторы из асбоцемента, 11 - торцевая комму-  
 тирующая шина.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ваганов В.Ф. et al. NIM, 1981, vol.190, p.9-14.
2. Карасюк В.Н., Сильвестров Г.И. Разработка импульсных радиационно-стойких магнитов с полем 5 Т. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1980, т.1, с.121.

3. Всеволожская Т.А. и др. Разработка протонного пучка для устранения эффектов теплового разрушения мишеней при работе с пучками высокой плотности. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1983, т. I, с. 317.
4. Бородин В.Е., Лебедев В.Н. и др. Радиационные нагрузки и радиационная стойкость конструкционных материалов на протонном синхротроне ИФВЭ. Препринт ИФВЭ ЛРН, 76-140, Серпухов, 1976.
5. Keizer R.L., Motier M. Radiation Resistant Magnets. CERN, 82-05, Super Proton Synchrotron. Geneva, 1982.
6. Афанасьев В.В. и др. Радиационностойкая электроизоляция на основе цементных вяжущих. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1984.
7. Вечеславов В.В. и др. Формирование поля в импульсном одновитковом магните с насыщающимся железом. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1978, т. I, с. 181.
8. Корневский В.В. и др. Напряженное состояние цементной электроизоляции импульсного магнита. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1984.

□