

Ускоряюще-фокусирующий канал ускорителя протонов высокой мощности на основе сверхпроводящих одноззорных резонаторов

Р.М. Венгров, Д.А. Кашинский, А.А. Коломиец, Д.А. Лякин, С.А. Минаев, А.В. Орлов,
В.И. Першин, Т.Е. Третьякова, Б.Ю. Шарков
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

В рамках разрабатываемой программы по созданию российской электроядерной установки в ИТЭФ и ряде других научных центров ведется проектирование высокоэффективного ускорителя протонов высокой мощности с непрерывным режимом работы. В соответствии с принятой концепцией в ускорителе будут использоваться сверхпроводящие резонаторы начиная с $\beta = 0.1 \div 0.14$. В ИТЭФ разработана конструкция одноззорных тороидальных резонаторов, вариант их размещения в криостате и конструкция типового криомодуля для промежуточных (до $\beta = 0.5$) энергий протонного пучка. Рассмотрена проблема ввода ВЧ-мощности в резонаторы в непрерывном режиме для варианта демонстрационного ускорителя. Исследована динамика сильнооточного пучка в спроектированном ускорительном тракте.

Введение

Для электроядерных установок необходим протонный пучок с энергией порядка 1 ГэВ и током до нескольких десятков миллиампер и более [1]. При токах пучка более 10 мА на сегодня нет других вариантов драйверов, кроме линейных протонных ускорителей (ЛПУ). Применение сверхпроводящих ускоряющих резонаторов позволяет существенно повысить КПД ускорителя. Причем в диапазоне 10–30 мА эффективными будут ускорители, имеющие теплую начальную часть, и сверхпроводящие – имеющие промежуточную и основную части.

Концепция линейного протонного ускорителя на энергию 1 ГэВ и ток пучка 30 мА предусматривает одноканальную схему с использованием RFQ с частотой 300 МГц в качестве начальной части и сверхпроводящих резонаторов для ускорения до конечной энергии. При скоростях протонов более 0.5 предусматривается использование эллиптических многоззорных СП резонаторов, работающих на частоте 600 МГц. В области промежуточных скоростей протонов предполагается использовать одноззорные тороидальные резонаторы также с рабочей частотой 600 МГц. Выбор рабочих частот определялся, в частности, тем, чтобы они были кратными частотам действующих ускорителей и экспериментальных структур в ИТЭФ, ИФВЭ и ИЯИ.

Главным достоинством подобной схемы является то, что ЛПУ сохраняет свою работоспособность в случае выхода из строя даже нескольких расположенных подряд резонаторов. В случае отсутствия по каким-либо причинам ускорения в любом из резонаторов пучок остается в области устойчивости без принятия специальных мер на последующем участке ускорения. Возникающие при этом колебания выходной энергии частиц не будут нарушать работоспособности мишенно-бланкетного комплекса. Независимое возбуждение каждого резонатора позволяет устранить вариации энергии и возникающие продольные когерентные колебания частиц за счет изменения фазы (амплитуды) ВЧ-поля, при которой пучок проходит ускоряющие зазоры, следующие за дефектным.

Помимо этого, применение одноззорных резонаторов дополнительно приводит к следующим положительным результатам:

- Расстояние между центрами ускоряющих зазоров может выбираться вне зависимости от скорости частиц в противоположность структурам с длинными резонаторами, в которых расстояние между зазорами кратно целому или полуцелому значению $\beta\lambda$. При этом длина ускорителя может быть сокращена на 30 – 40 % по сравнению с использованием традиционных многоззорных протяженных резонаторов.
- При использовании одноззорных резонаторов можно использовать существующие клистроны относительно небольшой мощности, используемые для телевизионного вещания или твердотельные усилительные приборы.
- В сверхпроводящей части ЛПУ могут быть использованы только два или три типа одноззорных резонатора.

1. Конструкция СП-резонаторов и типового СП-модуля

В настоящий момент известно несколько вариантов сверхпроводящих резонаторов, которые могут быть использованы для $0.1 \leq \beta \leq 0.5$. К ним относятся в частности тороидальные, четвертьволновые резонаторы, резонаторы типа "spoke" [2].

В ИТЭФ проведены расчетно-теоретические исследования по выбору типа сверхпроводящего резонатора и поиску его оптимальной конструкции для проектируемого ЛУ. Для диапазона скоростей протонов $0.1 \leq \beta \leq 0.5$ были выбраны тороидальные резонаторы. В оптимизированных для разных значений β резонаторах обеспечивается отношение максимального поля на поверхности резонатора к среднему полю на оси в диапазоне 4.5 – 1.93, что даст ускоряющие градиенты порядка 10 МэВ/м и выше. Некоторые параметры этих резонаторов приведены в табл. 1.

Критерием оптимизации являлось соотношение T/K , где T – фактор пролетного времени, а K – коэффициент перенапряжения ускоряющего зазора $K = E_{\max}/E_0$, где E_{\max} – максимальное поле на поверхности ускоряющего зазора, а E_0 определяется из соотношения

$$E_0 = \frac{1}{L} \int E_z dz$$

и является средним полем на оси резонатора с эффективной длиной L . Чем выше отношение T/K , тем выше темп ускорения в данном резонаторе при заданном E_{\max} .

Таблица 1. Результаты оптимизации резонаторов.

Рабочая частота резонатора, МГц	β	K	T	T/K	L
600	0.1	4.64	0.46	0.1	70.8
	0.4	2.47	0.83	0.335	115.2
	0.8	2.47	0.95	0.387	115.2
300	0.1	3.03	0.68	0.22	86.2
	0.4	2.88	0.97	0.338	91.2
	0.8	2.88	0.99	0.345	91.2

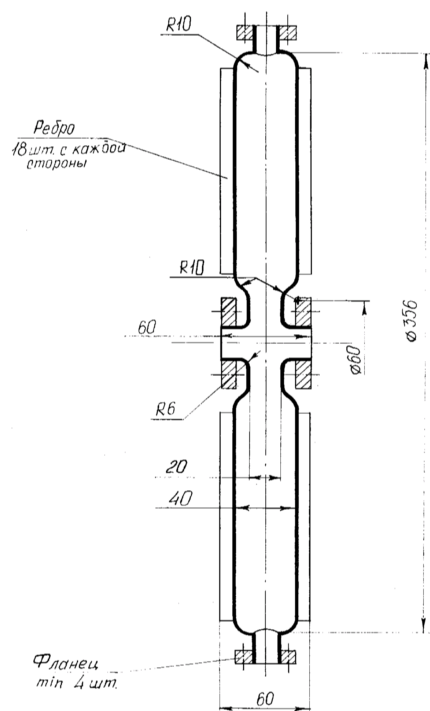


Рис. 1. Тороидальный резонатор на частоту 600 МГц.

На основании результатов оптимизации было проведено численное моделирование резонаторов с использованием программ "OPERA-3D", HP HFSS и разработанной в ИТЭФ программы с целью уточнения геометрической формы резонаторов и детализации распределений электромагнитных полей. На базе расчетов была проведена конструкторская проработка резонаторов. Эскизный чертеж резонатора на частоту 600 МГц и $\beta = 0.1$ приведен на рис. 1.

По результатам моделирования динамики сильнооточного пучка протонов была определена структура ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя для интервала скоростей $0.1 \leq \beta \leq 0.5$. Канал состоит из пар резонаторов с квадрупольными фокусирующими линзами между каждой парой. Каждая пара резонаторов помещена в индивидуальную гелиевую рубашку. Внутри резонаторов через проходные фланцы в гелиевой рубашке за счет откачки криомодуля будет обеспечен вакуум, а с наружной стороны резонаторы будут контактировать с жидким гелием. Резонаторы будут изготавливаться из ниобия толщиной 3 мм с коэффициентом RRR порядка 300–500. Резонаторы, гелиевая рубашка, системы настройки частоты и вводы ВЧ-мощности образуют типовой СП-модуль.

Общий вид типового СП-модуля с двумя резонаторами представлен на рис. 2.

Ввод ВЧ-мощности в каждый резонатор осуществляется со стороны верхней крышки криостата. Для контроля параметров ВЧ-поля в резонаторе предусмотрен измерительный узел, который располагается на наружной плоскости резонатора. Вывод сигнала осуществляется ВЧ-кабелем через верхнюю крышку криостата.

Подстройка частоты резонаторов осуществляется за счет деформации корпуса резонаторов. Устройства механической подстройки интегрированы с гелиевым кожухом и крепятся к нему через тепловые развязки. Грубая подстройка будет осуществляться с помощью привода от шагового двигателя, а тонкая – механизмом, использующим явление магнитострикции.

Ускорительный тракт в пределах одного криомодуля представляет из себя ряд СП-модулей на два резонатора с размещенными между ними квадрупольными фокусирующими линзами. Линзы находятся в вакууме и через тепловые развязки крепятся к гелиевой рубашке СП-модуля. При этом линзы будут находиться при температуре жидкого азота. Определенным численным моделированием ожидаемый уровень потерь частиц пучка будет приводить к тепловыделению в линзах порядка 5 Вт, для съема которого предусмотрено дополнительное контактное охлаждение линз из системы азотного контура. Предполагается, что в ускорителе будут использованы линзы на основе магнитотвердых материалов, однако возможность их применения должна быть экспериментально исследована.

2. Конструкция узла ввода ВЧ-мощности

Одним из наиболее проблемных устройств, обеспечивающих работу сверхпроводящего резонатора, является узел ввода ВЧ-мощности, особенно при существенной нагрузке резонатора пучком. Рассматривались два основных варианта ВЧ-вводов: коаксиальный и волноводный. Волноводный ввод не реализуем в нашем варианте резонаторов из-за значительных геометрических размеров и невозможности регулировки коэффициента связи с резонатором. Коаксиальные вводы более компактны и позволяют изменять коэффициент связи с резонатором за счет перемещения или вращения внутреннего проводника с антенной. На основании расчетов и анализа различных способов связи – связь петлей по магнитному полю, связь по электрическому полю с помощью штыря и ёмкостная связь, выбор был остановлен на последнем варианте. Этот способ обеспечивает широкую перестройку коэффициента связи без внесения элемента связи внутрь резонатора и наиболее прост с технологической точки зрения. Ввод ВЧ-мощности при этом осуществляется через небольшое окно.

Конструкция коаксиального узла ввода ВЧ-мощности с волновым сопротивлением 75 Ом и регулируемой емкостной связью показана на рис. 3.

ВЧ-вводы для каждой пары резонаторов помещены в общий широкий патрубок с проходящим в нем гелиевым паром. Оконечный патрубок внешнего коаксиального проводника выполнен из сверхпроводящего материала и жестко соединен с корпусом резонатора сваркой, при этом одна из боковых стенок резонатора является частью участка коаксиальной линии. Связь осуществляется через круглое отверстие в боковой стенке резонатора. Конец центрального проводника (антенны) расположен напротив от-

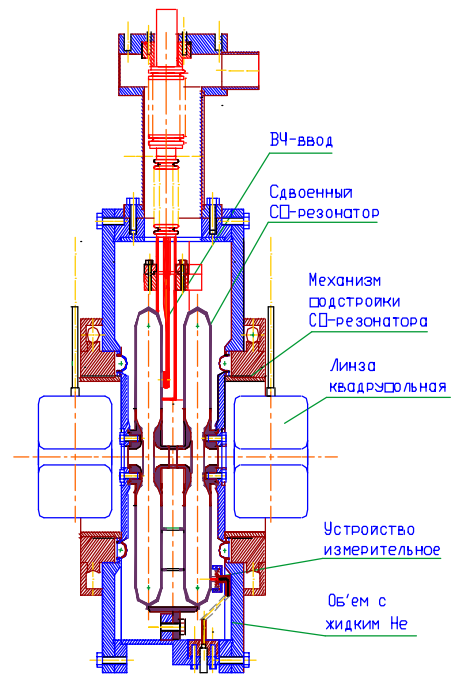


Рис. 2. Типовой СП-модуль.

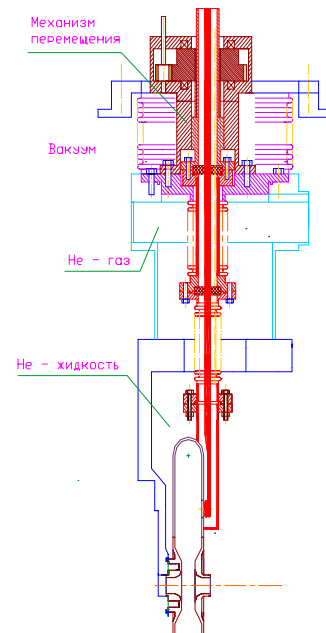


Рис. 3. Узел ввода ВЧ-мощности.

резонатора сваркой, при этом одна из боковых стенок резонатора является частью участка коаксиальной линии. Связь осуществляется через круглое отверстие в боковой стенке резонатора. Конец центрального проводника (антенны) расположен напротив от-

верстия связи. Антенна закреплена в керамическом ВЧ-окне, охлаждаемом гелиевым паром до температуры не выше 80 К. Величина связи изменяется при перемещении антенны вдоль оси.

На участке внешнего коаксиала между гелиевым сосудом и паротводным патрубком предусмотрен сильфон из нержавеющей стали, на внутреннюю поверхность которого нанесен тонкий проводящий слой меди. Обеспечивая продольное перемещение внешнего участка коаксиальной линии с антенной в вакууме, сильфон одновременно служит тепловой развязкой, предотвращая значительный теплоток от элементов конструкции, имеющих температуру жидкого азота в гелиевый сосуд. Далее в конструкции предусмотрен второй сильфон, не являющийся элементом коаксиальной линии, а лишь герметизирующий гелиевый паропровод. Наконец, третий широкий сильфон, в котором располагаются направляющие движения узлов ввода мощности, отделяет вакуумный объем от атмосферы. Механизм перемещения узла ввода размещен на внешней обложке криостата при комнатной температуре.

Заключение

Разработана конструкция типового криомодуля ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя высокой мощности для скоростей протонов в диапазоне $0.1 < -\beta < 0.5$, основанная на однозакорных СП-резонаторах с независимым возбуждением. Компьютерное моделирование показало, что данная конструкция позволяет обеспечить высокий темп ускорения, требуемую величину КПД, допустимый уровень потери частиц пучка как в режиме штатной работы, так и при выходе из строя некоторого числа резонаторов.

Определена геометрия резонаторов, разработан узел ввода ВЧ-мощности и устройства подстройки частоты. Степень проработки криомодуля позволяет приступить к его изготовлению и экспериментальной проверке принятых решений.

Список литературы

- [1] О.В. Шведов и др. Высокомощный линейный ускоритель протонов – драйвер электроядерных систем. Препринт ИТЭФ 35-99, Москва, 1999.
- [2] L. Bollinger. Low-b SC LINACS: Past, present and Future . – Proc. of the XIX Inter. LINAC Conf., ANL-98/28, Vol. 1 , p. 3, 1998.