

A-676

9/XII-69



# ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

**P9-4722**

Н.Г.Анищенко, А.С.Алексеев, Н.И.Балалыкин,  
А.А.Белушкина, В.А.Васильев, И.Н.Гончаров,  
Ю.С.Дерендяев, А.Г.Зельдович, Н.К.Зельдович,  
А.Б.Кузнецов, Ю.В.Муратов, Н.Б.Рубин, А.А.Сабаев,  
В.П.Саранцев, Ю.И.Смирнов, И.С.Хухарева,  
В.Г.Шабратов, Ю.А.Шишов

КРИОГЕННАЯ  
ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРИТЕЛЬНАЯ СЕКЦИЯ  
КОЛЬЦЕТРОНА

Дубна 1969

P9-4722

8100/2 up

Н.Г.Анищенко, А.С.Алексеев, Н.И.Балалыкин,  
А.А.Белушкина, В.А.Васильев, И.Н.Гончаров,  
Ю.С.Дерендяев, А.Г.Зельдович, Н.К.Зельдович,  
А.Б.Кузнецов, Ю.В.Муратов, Н.Б.Рубин, А.А.Сабаев,  
В.П.Саранцев, Ю.И.Смирнов, И.С.Хухарева,  
В.Г.Шабратов, Ю.А.Шишов

КРИОГЕННАЯ  
ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРИТЕЛЬНАЯ СЕКЦИЯ  
КОЛЬЦЕТРОНА

Доклад на VII международной  
конференции по ускорителям (Ереван, 1968)

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## 1. Введение

В предложенной в [1,2] схеме коллективного линейного ускорителя тяжелых частиц на высокие энергии ионы ускоряются внутри электронных колец, пролетая вместе с ними через систему последовательных резонаторов. Система резонаторов сочетается с продольным магнитным полем, необходимым для поддержания вращательного движения электронов в кольцах. Если обеспечены условия ускорения колец под действием определенной постоянной силы, то эффективное ускоряющее поле, действующее на ионы, находящиеся на краю сгустка, будет описываться формулой

$$E_{\perp} \approx 2,4 \sqrt{\frac{N_e}{10^{13}}} \frac{\text{МВ}}{\text{см}}, \quad (1.1)$$

где  $N_e$  - полное число электронов в кольце, а численный коэффициент соответствует типичным параметрам из работы [3]. Предполагается, что на ускоряемые сгустки действуют фокусирующие силы, сохраняющие продольные размеры сгустков неизменными в сопутствующей системе координат [4]. Соответствующее (1.1) внешнее ускоряющее "допустимое" электрическое поле должно быть равным

$$E_{\text{доп.}} = \frac{m}{M} \gamma_{\perp} \frac{(1 + N_i M / N_e m \gamma_{\perp})}{(1 + m \gamma_{\perp} / M)} E_{\perp} \quad (1.2)$$

Здесь  $M$  - массы электрона и иона,  $N_1$  - число ионов в кольце,  $\gamma_{\perp} = 1/\sqrt{1-\beta_{\perp}^2}$ ,  $\gamma_{\parallel} = 1/\sqrt{1-\beta_{\parallel}^2}$ ,  $\beta_{\perp}$  - относительная (отнесена к скорости света) скорость вращения электронов в покоящемся кольце,  $\beta_{\parallel}$  - продольная относительная скорость кольца. Например, при  $N = 5 \cdot 10^{13}$  получаем  $E_1 = 5,4$  мв/см, что при  $\gamma_{\perp} \approx 50$ ,  $\frac{N_1}{N_0} \approx 10^{-2}$  дает  $E_{\text{доп.}} = 200 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ . В ряде расчетов полезно использовать также величины  $\xi_{11/2}$ ,  $\xi_{1/2\text{доп.}}$  которые в два раза меньше данных и при которых увеличение внешнего поля в два раза еще не приводит к отрыву ионов от кольца.

Ниже будут рассмотрены возможности ускоряющей системы, состоящей из набора цилиндрических резонаторов, разделенных фокусирующими трубами /4/, и приведены данные по проекту 2-метровой ускорительной секции, включающей сверхпроводящие соленоиды продольного магнитного поля и, возможно, сверхпроводящие резонаторы.

## 2. Энергообеспечение пучка

При выборе параметров резонаторов надо учитывать ряд факторов. Во-первых, желательно, чтобы система была компактна, т.е. рабочая длина волны была небольшой. Во-вторых, для передачи ускоряемым сгусткам достаточно большой энергии необходимо, чтобы ее было достаточно запасено в резонаторах. Для обеспечения необходимых точностей нужно, чтобы ускоряющее электрическое поле в резонаторах  $E_{\text{рез}}$  на заметную величину превышало тормозящее действие переходного излучения, т.е. чтобы

$$E_0 = E_{\text{рез.}} - \bar{E} \geq \bar{E}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{E}$  - абсолютная величина тормозящего поля.

Для обеспечения фокусировки нужно иметь достаточное пространство между резонаторами и в то же время желательно, чтобы оно "не пропадало даром" для ускорения. Поэтому надо выбирать  $E_0 > E_{\text{доп.}}$  с помощью продольного магнитного поля специальной конфигурации "размазывать" /1,2/ ускоряющую силу на весь период, включающий резонатор и промежутки.

а) Выбор напряженности и длины волны электрического поля.

Энергия, которая должна быть запасена в резонаторах, отнесенная к единице длины ускорителя, равна:

$$W_{\text{зап.1}} = 3,4 \cdot 10^{-2} R_{\text{рез}}^2 (E_0 + \bar{E})^2 \frac{E_{\text{доп.}}}{E_0} \quad (2.2)$$

Здесь множитель  $E_{\text{доп.}}/E_0$  обусловлен тем, что длина периода должна быть равна  $L = h E_0 / E_{\text{доп.}}$ , где  $h$  - протяженность резонатора вдоль траектории сгустка ( $h \approx \lambda \beta_{\parallel} / 4$ ). Функция (2.2) имеет минимум при  $E_0 = \bar{E}$ . Если такое значение  $E_0$  больше  $E_{\text{доп.}}$  с необходимым запасом, то его следует выбирать в качестве рабочего. При этом резонаторы должны быть расположены так, чтобы средняя энергия, которую потребляет сгусток на единице длины ускорителя, равнялась:

$$W_{\text{пуч.1}} = e N_0 E_{\text{доп.}} \quad (2.3)$$

Используя оценки /5/ величины  $\bar{E}$ , получаем, что при  $E_0 = \bar{E}$

$$a = \frac{W_{\text{пуч.1}}}{W_{\text{зап.1}}} \approx 0,25 \quad (2.4)$$

Изучение зависимости  $\bar{E}$  от  $\lambda$  показывает, что при  $h \gg R \beta_{\parallel}$  ( $R$  - радиус кольца)  $\bar{E} \approx \lambda^{-2}$ . Тогда при  $E_0 = \bar{E}$  находим, что  $W_{\text{зап.1}}$  не зависит от длины волны, так как  $R_{\text{рез}} \approx \lambda$ . Это легко понять, если учесть, что малые резонаторы (с меньшей длиной волны) надо располагать реже и давать в них большую напряженность, чем в больших резонаторах. Некий компромисс, учитывающий требования, накладываемые криогенной техникой на габариты системы, и другие упомянутые выше факторы, привел нас к выбору  $\lambda = 60$  см.

б) Выбор числа  $N_0$  электронов в кольце

При выборе числа электронов надо учитывать, что переходное излучение, именно  $\bar{E} \approx N_0^k$ , а ускоряющее ионы поле  $E_1 \approx \sqrt{N_0}$ . Поэтому

применительно к данной ускоряющей системе величину  $N_0$  следует разумно ограничить. Ниже приводится ориентировочная таблица интересующих нас параметров, рассчитанная для  $L/h = 4$ .

Таблица 1

№№	$N_0/10^{13}$	$E_{рез} (\frac{КВ}{СМ})$	$E_0 (\frac{КВ}{СМ})$	$E_{1/2 доп} (\frac{КВ}{СМ})$	$E_{1/2} (\frac{МВ}{СМ})$	$W_{пуч.1} (\frac{ДЖ}{СМ})$	$W_{зап.1} (\frac{ДЖ}{СМ})$	$\alpha$
1	4,5	720	360	90	2,6	0,65	2,6	0,25
2	4,5	500	140	90	1,0	0,26	1,3	0,20
3	3,1	550	300	75	2,1	0,37	1,5	0,25
4	3,1	500	250	75	1,8	0,31	1,2	0,25
5	2,0	300	150	60	1,1	0,12	0,5	0,25

Видимо, надо ориентироваться на 3+5 строки. Величины  $E_1$ ,  $E_{доп}$  взяты здесь в два раза меньшими возможных. В принципе при создании большого ускорителя следует рассчитывать на градиенты энергии ионов  $\approx 4 \frac{МэВ}{СМ}$ .

### 3. Режимы работы, мощности источников питания, к.п.д.

Режимы работы генераторов в.ч. питания, их импульсная  $P_{ген.1}$  и средняя мощности  $\bar{P}_{ген.1}^{x/}$ , тепловые потери, к.п.д. существенно зависят от добротности резонаторов. Ниже приводится табл. 2 этих величин, рассчитанная для четвертой строки табл. 1. Длительность импульсов работы генераторов выбрана так:

$$\tau_{ген} = \min \begin{cases} Q/\omega \\ \tau \text{ (непрерывный режим)} \end{cases} \quad (4.1)$$

Здесь  $\tau$  - временной интервал между последовательными прохождениями ускоряемых сгустков через систему. Последняя колонка таблицы  $\bar{N}_1$  - среднее число ускоренных ионов в 1 сек в предположении  $N_1/N_0 \approx 10^{-2}$ .

<sup>x/</sup> Индексом "1" отмечаются величины, отнесенные к единице длины.

Таблица 2

Q	$\tau$ (сек.)	$\tau_{ген}$ (сек.)	$\bar{P}_{ген1}(\frac{Вт}{М})$	$\bar{P}_{ген2}(\frac{Вт}{М})$	$\bar{P}_{ген3}(\frac{Вт}{М})$	$\bar{P}_{ген4}(\frac{Вт}{М})$	К.П.Д.	$\bar{N}_1 / 10^{11}$		
$10^5$	↑ 5,00	↓ $3,2 \cdot 10^{-5}$	↑ $6 \cdot 10^6$	38	6	32	↑	0,6		
	0,10		1910	300	1610	0,16		31,0		
	↓ 0,01		↓	19110	3000	16110		↓	310	
$10^8$	↑ 5,00	↑ $3,2 \cdot 10^{-2}$	↑ $6,0 \cdot 10^3$	38	6	32	↑	0,6		
	0,10		$5,8 \cdot 10^3$	1850	300	1550		0,16	31,0	
	↓ 0,01		непрер. режим	$6,3 \cdot 10^3$	6000	3000		3000	0,49	310
$10^{10}$	↑ 5,00	↓ 3,2	50	32	6	26	↑	0,8		
	0,10		непрер. режим	533	333	300		33	0,89	31,0
	0,01		непрер. режим	3028	3028	3000		28	0,95	310
	↓ 0,005		↓	6028	6028	6000		28	0,99	620

Вариант с добротностью  $Q \approx 10^5$ , которая может быть, по-видимому, получена при охлаждении резонаторов жидким азотом, требует специальных источников в.ч. питания с высокой импульсной мощностью ( $6 \frac{МВт}{М}$  и  $\tau_{ген} \approx 30$  мксек) и  $\lambda = 60$  см.

Если путем использования сверхпроводимости будет получена добротность порядка  $10^8$ , то возможным режимом работы при  $E_{1/2} \approx 2 \frac{МВ}{СМ}$  будет такой, когда кольца следуют друг за другом через интервалы времени  $\approx 5$  сек. Тогда тепловые потери будут  $30 \frac{Вт}{М}$ ; охлаждение - жидким гелием. Импульсная мощность генераторов в.ч.  $\approx 6 \frac{кВт}{М}$ , средняя - несколько выше мощности тепловых потерь. Наиболее выгодный режим - при  $Q \approx 10^{10}$ . Если такую добротность удастся получить, тогда при той же мощности тепловых потерь  $\approx 30 \frac{Вт}{М}$  и непрерывной мощности генераторов  $\approx 6 \frac{кВт}{М}$  можно существенно увеличить частоту следования колец и получить интервалы времени между следующими друг за другом кольцами  $\approx 5$  мсек, т.е. в 1000 раз чаще, чем при  $Q = 10^8$ .

#### 4. Формирование продольного магнитного поля

Для поддержания радиального размера кольца в ускоряющей системе предполагается применить продольное магнитное поле  $\approx 20$  кГс, создаваемое сверхпроводящими катушками. Для этого требуется  $\approx 1,5 \cdot 10^4 \frac{\text{а.витков}}{\text{см}}$ , что, например при радиальной толщине катушки 6 см, соответствует плотности тока  $0,25 \cdot 10^4 \frac{\text{а}}{\text{см}^2}$ .

При создании продольного магнитного поля важно следить за тем, чтобы возможные неоднородности его не создавали значительных радиальных компонент поля  $B_r$ . Компонента  $B_r$  вызывает появление продольных сил, действующих на кольцо, которые могут привести к отрыву ионов. Потребуем, чтобы ошибка  $\Delta B_r$  удовлетворяла неравенству

$$\Delta B_r \leq \chi |E_{\text{доп}}/\gamma_{||}|. \quad (4.1)$$

Если бы  $\chi = 1$  на участке ускорителя, на котором совершается несколько ионных колебаний, то ионы сместились бы к краю ступки и могли бы потеряться. Периоды ионных колебаний на различных участках ускорителя различны. Поэтому  $\chi$  надо выбирать в зависимости от характерного периода ошибок и его отношения к периоду ионных колебаний. Ориентировочно беря  $\chi = 0,1 + 0,2$  ( $\Delta B_r \approx 25 + 50$  Гс), получаем, что на начальном участке ускорителя допуск на  $\Delta B_z / b_z$  с характерным периодом  $\approx L$  или в несколько раз меньшим будет  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ .

Если катушка радиуса  $R_{\text{кат}} \approx 25$  см выполнена из отдельных витков с расстоянием между ними  $d$ , то должно быть  $R/d \geq 2$ . Создание специальной модуляции продольного магнитного поля <sup>12/</sup> для периодического перевода накопленной кольцом вращательной энергии в поступательную предлагается осуществить дополнительными катушками. Требуемые токи в них просчитываются на ЭВМ с использованием фурье-анализа требуемого поля. Предусматривается необходимая свобода манипулирования токами отдельных секций этих катушек.



## 5. Предварительные эксперименты по выбору материала для сверхпроводящих резонаторов

С целью выбора материала для сверхпроводящих резонаторов, находящихся в сильном магнитном поле, были начаты опыты по исследованию поведения сверхпроводящих сплавов в с.в.ч. полях. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне 500 Мгц на коаксиальных полуволновых резонаторах. Для внутреннего проводника коаксиала использовалась проволока диаметром от 0,5 до 0,2 мм из сверхпроводника. Простота конструкции резонатора позволила быстро произвести исследования большого количества сверхпроводников и определить группу сверхпроводящих материалов, которые могут быть использованы в качестве рабочего вещества покрытия резонатора.

В процессе эксперимента определялась зависимость добротности резонатора от температуры охлаждения до  $T = 1,6^{\circ}\text{K}$  и внешнего магнитного поля до 30 кэ. Добротность резонатора определялась методом измерения времени затухания переходного процесса. По измеренной добротности  $Q$  рассчитывалось поверхностное сопротивление  $R_s$  сверхпроводящего материала по формуле

$$Q^{-1} = \Lambda R'_s + \sigma K_s, \quad (5.1)$$

где  $R'_s$  - поверхностное сопротивление наружного проводника, а  $R_s$  - исследуемого внутреннего сверхпроводника,  $\Lambda$ ,  $\sigma$  - коэффициенты, определяемые геометрическими размерами резонатора.

Обозначим  $F$  отношение добротности резонатора с покрытием из сверхпроводящего материала к добротности аналогичного медного резонатора при комнатной температуре. Для сплавов Nb-Zr при  $1,8^{\circ}\text{K}$  и  $H = 0$  этот фактор увеличения добротности  $F = 900 + 1000$  и для сплава Nb-Ti  $F \approx 900$ . Внешнее магнитное поле  $H_{||} \approx 20$  кэ снижает фактор в 1,4 + 1,6 раза.

Следует отметить, что мы исследовали коммерческие сверхпроводники без обработки поверхности. По данным /6/, обработка существенно уменьшает поверхностное сопротивление сверхпроводника. Следовательно, мож-

но ожидать значения добротности рабочего резонатора с покрытием из сверхпроводников 2 рода  $\approx 10^8$  и выше при  $T = 1,8^\circ\text{K}$  и внешнем магнитном поле 20 кэ.

## 6. Вопросы технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов

При разработке сверхпроводящего ускорителя немаловажной технической проблемой является получение необходимой сверхпроводящей поверхности. На опытной стадии проектирования при выполнении экспериментальных проверок возможно изготовление резонатора из цельного куска сверхпроводника. Применение таких резонаторов в большом масштабе чрезвычайно дорого. В настоящее время существует несколько способов получения сверхпроводящих покрытий: электролитическое осаждение, катодное напыление, плакировка листом и др.

Нами разрабатывается способ нанесения сверхпроводящего покрытия в тлеющем разряде с предварительным испарением сверхпроводника, либо его компонентов. Для обеспечения чистоты процесса вакуумная камера предварительно откачивается до давления  $10^{-9}$  тор. Рабочий процесс ведется при  $10^{-3}$  тор. В целях минимального загрязнения сверхпроводника выбран испаритель электроннолучевого типа с кольцевым катодом прямого накала. При работе испарителя электростатически фокусируемый поток электронов бомбардирует напыляемый материал, вызывая его испарение. Поток испаряющихся частиц, попадая в область тлеющего разряда, ионизируется и увлекается на резонатор. Поверхность резонатора предварительно очищается в тлеющем разряде в атмосфере аргона.

Описанный способ нанесения сверхпроводящего покрытия обеспечивает химическую чистоту сверхпроводника и чистоту поверхности резонатора. При нанесении сверхпроводника 2 рода представляется возможным испарять не только готовый материал, но и отдельно требуемые компоненты с учетом получения результирующего состава, близкого к стехиометрическому.

В дальнейшем в качестве источника тепла для испарения предполагается использовать энергию луча лазера, что позволит в большой степени

свести к минимуму загрязнение сверхпроводника и разрешит получать напыление внутренней поверхности резонатора, не разрезая последний.

## 7. Криогеника и общая схема ускоряющей секции

Для обработки различных параметров ускоряющей системы и окончательного их выбора при проектировании коллективного линейного ускорителя на высокие энергии спроектирована одна секция ( $\approx 2$  м) с четырьмя резонаторами. Промежутки между резонаторами взяты в два раза больше, чем те, которые использовались в табл. 1. Поэтому тепловые потери и остальные характерные параметры табл. 2 уменьшаются в два раза.

Схематически секция изображена на рис. 1. Соосность резонаторов (1) между собой и с удерживающими соленоидом (2) обеспечивается точно обработанной трубой (3), являющейся одновременно внутренней оболочкой криостата (4) удерживающего соленоида. Между резонаторами расположены перфорированные фокусирующие трубы (6). Резонаторы опираются на трубу (3) через шарикоподшипники (5), обеспечивающие необходимую точность и вместе с тем обладающие значительным термическим сопротивлением, что позволяет иметь температуру резонаторов, отличную от температуры криостата (4). Концентрично с фокусирующими трубами (6) помещены корректирующие соленоиды (7). Секции обмотки этих соленоидов имеют раздельное электропитание, что позволяет устанавливать корректирующее поле различных конфигураций. Резонаторы снабжены ванночками (3), в которые может быть подан любой хладагент — от сверхтекучего гелия до жидкого азота. Криостат (4) охватывается азотным экраном (8). Все узлы секции заключены в вакуумный кожух (10). Теплоизоляционное вакуумное пространство и пространство ионопровода сообщаются между собой и имеют общий вакуум  $\sim 10^{-6}$  тор. Внешние криогенные устройства, не показанные на рис. 1, состоят из систем снабжения секции хладагентами, создания вакуума, аварийного сброса газа, газового пульта управления, пульта управления сверхпроводящими соленоидами, системы электропитания и эвакуации энергии соленоида. Выполнение криогенных устройств ускорительной секции с требуемыми точностями представляет опре-

деленные технологические трудности, поэтому вопросы допусков и иные задачи будут решаться на опытном экземпляре секции.

### Л и т е р а т у р а

1. В.И. Векслер, В.П. Саранцев, А.Г. Бонч-Осмоловский, Г.В. Долбилов, Г.А. Иванов, И.Н. Иванов, М.Л. Иовнович, И.В. Кожухов, А.Б. Кузнецов, В.Г. Маханьков, Э.А. Перельштейн, К.А. Решетникова, Н.Б. Рубин, П.И. Рыльцев, О.И. Ярковой. Коллективное линейное ускорение ионов. Препринт ОИЯИ, Р-3440-2, Дубна, 1967. А.Э., 24, 317 (1968).
2. А.Г. Бонч-Осмоловский, Г.В. Долбилов, О.А. Колпаков, А.Б. Кузнецов, В.Н. Мамонов, К.А. Решетникова, Н.Б. Рубин, С.Б. Рубин, В.П. Саранцев. Система ускорения электронного кольца, нагруженного ионами. Препринт ОИЯИ, Р9-4171, Дубна, 1968.
3. И.Н. Иванов, М.Л. Иовнович, А.Б. Кузнецов, Ю.Л. Обухов, К.А. Решетникова, Н.Б. Рубин, В.П. Саранцев, О.И. Ярковой. Вопросы движения частиц в адгезаторе. Препринт ОИЯИ, Р9-4132, Дубна, 1968.
4. А.Г. Бонч-Осмоловский, Г.В. Долбилов, И.Н. Иванов, Э.А. Перельштейн, В.П. Саранцев, О.И. Ярковой. Фокусировка заряженного электронного кольца в линейном коллективном ускорителе ионов. Препринт ОИЯИ, Р9-4135, Дубна, 1968.
5. С.Б. Рубин, В.Н. Мамонов. Об ускорении релятивистского сгустка с большим зарядом в резонаторе. Препринт ОИЯИ, Р-3346-2, Дубна, 1967.
6. A.P. Banford. Radio-Frequency Measurements on Super-Conductors for Proton Linac Resonant Cavities. International conference on high energy accelerators. P-541, Dubna, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел

9 октября 1969 года.

