

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ И НАКОПИТЕЛЕЙ НА СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

А. А. ВАСИЛЬЕВ, А. И. ДЗЕРГАЧ, Р. А. МЕЩЕРОВ, Е. С. МИРОНОВ

Радиотехнический институт АН СССР

А. Г. Зельдович

Объединенный институт ядерных исследований, СССР

Докладчик Е. С. Миронов

Успехи, достигнутые в создании сверхпроводящих материалов, открывают новые возможности в области ускорительной техники. В частности, использование сверхпроводящих магнитов может способствовать созданию ускорителей и накопителей на энергии вплоть до нескольких тысяч Гэв.

С точки зрения выигрыша в электропитании наиболее выгодно использовать сверхпроводящие материалы в установках с постоянным магнитным полем. Однако и в ускорителях с переменным магнитным полем применение сверхпроводящих магнитов может дать существенный эффект [1].

Ниже рассматриваются три варианта использования сверхпроводящих магнитов: в протонном синхротроне с переменным магнитным полем на энергию до 4000 Гэв, в ускорителе с комбинированным (сверхпроводящим и железным) магнитом [2] и в накопительных кольцах, предусматриваемых для проектируемого протонного синхротрона на энергию 1000 Гэв [3].

В ускорителе со сверхпроводящим магнитом основными элементами, определяющими его стоимость, являются обмотка магнита, источник его питания и криогенная система. Стоимость этих систем определяется в основном объемом сверхпроводника ($V_{\text{сн}}$), мощностью источника питания (w) и тепловыделением в криостате магнита за счет перематничивания сверхпроводника (\dot{Q}). Приближенные оценки этих величин можно получить с помощью следующих выражений:

$$V_{\text{сн}} = \frac{2}{15} \frac{ER_{\text{ср}}}{j_c} 10^9, \quad (1)$$

$$W = \frac{\pi}{3} \frac{EHR_{cp}^2}{t}, \quad (2)$$

$$P = \frac{2}{9} \frac{EHR_{cp}\delta}{t}. \quad (3)$$

Стоимость ускорителя будет уменьшаться, если при постоянной величине энергии (E) и напряженности поля (H) уменьшать средний радиус сечения магнита (R_{cp}), толщину сверхпроводящих жил (δ) и увеличивать длительность ускорения (t). Сечение магнита зависит от апертуры камеры и толщины обмотки. Апертура камеры определяется в основном параметрами пучка при инжекции и вряд ли может быть существенно уменьшена. Размер обмотки зависит от критической плотности тока в сверхпроводнике (J_c) и не может меняться произвольным образом. Время же ускорения и толщину жил можно менять в широких пределах.

В качестве примера рассмотрим протонный синхротрон на энергию 4000 Гэв с временем ускорения, равным 4 сек, и будем рассматривать кабель с диаметром сверхпроводящих жил в 1 микрон.

Основные параметры ускорителя приведены в таблице 1. Наиболее существенными являются вес сверхпроводника и тепловыделение в криостате. Вес сверхпроводника рассчитан в предположении, что обмотка магнита имеет внутренний диаметр 8 см, толщину 1 см и среднюю плотность тока 10^5 а/см². Последняя величина выбрана с учетом будущего повышения критической плотности тока для сплава NbTi до $J_c = 3 \cdot 10^5$ а/см² за счет улучшения технологии его изготовления (в настоящее время $J_c = 1,5 \cdot 10^5$ а/см²).

Тепловыделение в криостате (на погонный метр магнитного блока) определяется потерями на перемагничивание сверхпроводника — 0,45 вт, нагрев за счет вихревых токов в металлических конструкциях магнита — 0,11 вт, рассеянием частиц высоких энергий — 0,12 вт и теплопритоком через изоляцию криостата — 0,29 вт.

В качестве альтернативы сверхпроводящему магниту с переменным полем может быть предложена схема построения магнита из чередующихся магнитных блоков двух типов: сверхпроводящих с постоянным полем и железных с переменным магнитным полем.

Такой комбинированный магнит можно применять как для модернизации действующих ускорителей (например, Серпуховского), так и для последующего развития проектируемых ускорителей на сверхвысокие энергии. Наиболее естественным представляется использование комбинированного магнита в каскадном синхротроне с концентрическим расположением колец одинакового радиуса R в общем тоннеле.

Увеличение энергии частиц в этой системе определяется отношением максимума среднего поля выходного каскада к максимальному полю железных магнитов.

Некоторые примеры возможных параметров каскадных схем приведены в таблице II.

Получение устойчивых бетатронных колебаний в таких структурах возможно, если в магнитном периоде обеспечено независимое изменение поля и градиента. Простейшей и наиболее экономичной структурой нужного типа является магнитный период вида $F_s Q_F M D_s Q_D$ (F_s, D_s — градиентные сверхпроводящие магниты, Q_F, Q_D — железные квадруполь, M — железный поворотный магнит), для которого набег фазы бетатронных колебаний определяется с точностью до 1% выражением

$$\cos \mu = 1 - a\varphi^4 - b\varphi^2\varphi_s^2 - c\varphi_s^4, \quad (4)$$

$$\text{где } a = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{L}{l} + \frac{2}{3} \frac{l_s}{l} + \frac{Ll_s + l_s^2}{2l^2}, \quad b = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{l_s} + \frac{L}{l} \right),$$

$$c = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{L}{l_s} + \frac{2}{3} \frac{1}{l_s} + \frac{Ll + l^2}{2l_s^2}, \quad \varphi(p) = l \sqrt{\frac{lB'}{p}},$$

$$\varphi_s(p) = l_s \sqrt{\frac{lB'_s}{p}},$$

l_s, l_1, L длины участков $F_s(D_s), Q_F(Q_D)$ и M соответственно, B' и B'_s — градиенты полей, p — импульс частиц. Программное изменение $\varphi(p)$ т. е. тока в квадрупольях, позволит стабилизировать число бетатронных колебаний. Мощность квадрупольей не велика. Так, для случая, соответствующего 2-ой строке табл. II ($R=2450$ м, $Q \approx 10,2, l_s=110$ м, $L=55$ м), линзы имеют длины по 3 м, а градиент в них изменяется за время ускорения от 0 до 1,76 кэ/см. Расчеты показывают также, что амплитудная функция бетатронных колебаний в процессе ускорения меняется в пределах $\pm 10\%$.

В комбинированных магнитах возникает увеличение апертуры, связанное с изменением знака кривизны орбиты. Для того, чтобы оно не превышало 10 мм, длины чередующихся магнитов должны быть не более $2 \div 7$ м для $R=250 \div 2500$ м. Чередование коротких частей магнитов M, F_s и D_s приведет к небольшому отклонению необходимой программы изменения тока в квадрупольях, которое может быть найдено с помощью цифровой машины.

Можно предусмотреть «совместимую» структуру периода, в которой первоначально все магниты — железные, а впоследствии часть их заменяется на постоянные сверхпроводящие.

Весьма перспективным представляется использование сверхпроводящих магнитов с постоянным полем в накопительных кольцах. В этом случае существенно увеличивается число накопленных частиц. Предельное число накопленных частиц с точки зрения поперечной устойчивости растет пропорционально $\frac{\gamma Q}{R} \sim \sqrt{\gamma H}$, так как $Q \sim \bar{R}$. При задан-

ном эмиттансе и энергии инжекции высота пучка пропорциональна $H^{-0,25}$. В результате светимость оказывается пропорциональной $H^{3,25}$.

Напряженность магнитного поля в сверхпроводящих накопительных кольцах может быть в несколько раз выше, чем в обычных кольцах, и светимость может быть увеличена более чем на 2 порядка. Дополнительное увеличение предельно допустимого числа накопленных частиц обусловлено отсутствием эффектов магнитного отражения пучка и резким ослаблением электростатического отражения в накопительных кольцах, которые могут быть сделаны с вакуумной камерой, имеющей в поперечном сечении круглую форму. При учете всех факторов выигрыш в светимости может достигать величин $\sim 10^4$. Высокая плотность пучков в сверхпроводящих накопителях обеспечивает также повышенное соотношение эффект/фон. Это дает основание считать сверхпроводящие накопители сильноточными накопителями.

Для заполнения сверхпроводящих колец требуется высокая фазовая плотность пучка в ускорителе, которая может быть получена при условии перевода пучка из одного каскада ускорителя в другой без существенного изменения формы сгустков частиц.

В рассматриваемом варианте накопителя энергия частиц выбрана равной 250 Гэв, что соответствует эквивалентной энергии $1,3 \times 10^5$ Гэв. Основные параметры сверхпроводящих накопительных колец приведены в таблице III.

Сверхпроводящая обмотка представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 14 см и наружным — 20,7 см, при принятой в расчете средней плотности тока 5×10^4 а/см². Вес ленты из Nb_3S_n , необходимой для магнита одного кольца, составляет 43,5 тонны.

Суммарный теплоприток в криостате одного кольца равен 140 вт (без учета потерь частиц высокой энергии). Стоимость криогенной системы такой производительности существенно меньше стоимости сверхпроводящего магнита.

Следует отметить, что в сверхпроводящих накопителях и ускорителях автоматически решается вопрос получения сверхвысокого вакуума. Специальной системы фактически не требуется, поскольку поверхность сверхпроводящего магнита может служить одновременно стенкой камеры и мощным криогенным насосом, способным создать вакуум 10^{-10} – 10^{-12} мм рт. ст.

Таким образом применение сверхпроводящих магнитов с сильными полями может значительно сократить размеры ускорителей и накопителей, а также привести к некоторым качественно новым характеристикам этих установок.

В заключение авторы выражают благодарность академику А. Л. Минцу за внимание к работе.

Таблица 1

**Ориентировочные параметры протонного синхротрона на энергию 4000 Гэв
с импульсным сверхпроводящим магнитом**

№ № п/п	П а р а м е т р	В е л и ч и н а
1.	Энергия протонов	4000 Гэв
2.	Напряженность магнитного поля	64 кэ
3.	Средний радиус ускорителя	2717 м
4.	Число магнитных блоков	1920
5.	Длина магнитного блока	6,8 м
6.	Мощность источника питания магнита	1200 Мва
7.	Мощность ускоряющей системы	37 Мвт
8.	Вес сверхпроводника в магните	60 т
9.	Общее тепловыделение в криостате	11,8 кВт
10.	Апертура вакуумной камеры	68 x 66 мм ²
11.	Время ускорения частиц	4 сек
12.	Период изменения магнитного поля	13 ссек
13.	Число ускоренных частиц	$1 \cdot 10^{14}$

Таблица 2

Некоторые параметры каскадных синхротронов с комбинированными электромагнитами

№ № схемы	n каскада	тип каскада*	Диапазон из- менения среднего поля, кэ	Энергия частиц (1 эв)	
				при R=2450 м.	при R=250 м.
1	I	Железный	0 ÷ 16	1000	98
	II	0,46 СП—50	16 ÷ 31	2080	205
	III	0,71 СП—50	31 ÷ 40	2670	270
2	I	Железный	0 ÷ 16	1000	98
	II	0,33 СП—100	16 ÷ 47	2950	290

*) Запись типа 0,46 СП-50 означает, что магнит каскада состоит на 46% из сверхпроводящих блоков с полем 50 кэ.

Основные параметры сверхпроводящих накопительных колец

№ № п/п	Параметр	Величина
1.	Номинальная энергия протонов	250 Гэв
2.	Эквивалентная энергия	$1,3 \cdot 10^5$ Гэв
3.	Средний радиус	150 м
4.	Напряженность магнитного поля	105 кэ
5.	Высота пучка	0,8 см
6.	Разброс по импульсам	$\pm 1\%$
7.	Ширина пучка	5,7 см
8.	Апертура вакуумной камеры	12 x 12 см ²
9.	Предельное по объемному заряду число накопленных частиц	$5,5 \cdot 10^{16}$
10.	Фактическое число накопленных частиц	$2,6 \cdot 10^{16}$
11.	Светимость	$2,1 \cdot 10^{34}$ сек ⁻¹ см ⁻²
12.	Соотношение эффект/фон при $r = 10^{-11}$ мм рт.ст.	$3 \cdot 10^3$
13.	Время накопления	6,6 часа
14.	Время жизни пучка при $r = 10^{-11}$ мм рт.ст.	~100 суток

ЛИТЕРАТУРА

1. P. F. Smith, J. D. Lewin, Nucl. Instr. and Meth, 52, № 1, 298 (1967).
2. А. И. Дзергач, Кольцевой ускоритель заряженных частиц, Заявка на изобретение от 3 апреля 1968 г. № 1230180/26—25.
3. Э. Л. Бурштейн, А. А. Васильев, А. Л. Минц, Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 21—27 авг. 1963 г., Атомиздат, Москва, 1964 г., стр. 67.
4. А. Л. Минц, А. А. Васильев и др., Кибернетический ускоритель на энергию 1000 Гэв. Радиотехнический институт АН СССР, НТ, 9267-148.