

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С 345г1
Д-405

P9 - 9066

ЛЯП

В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга

4283/4-75

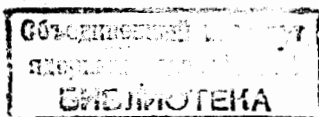
"СУПЕРЦИКЛОТРОН" - ПЕРСПЕКТИВА
ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ
СИЛЬНОТОЧНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ -
- ФАБРИК МЕЗОНОВ

1975

P9 - 9066

В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга

"СУПЕРЦИКЛОТРОН" - ПЕРСПЕКТИВА
ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ
СИЛЬНОТОЧНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ -
- ФАБРИК МЕЗОНОВ



В разработанных около 10 лет тому назад проектах первых мезонных фабрик, постепенно вводимых сейчас в действие, максимальные интенсивности ускоренных пучков протонов с энергиями 500+800 МэВ ограничивались значениями 0,1 + 1,0 мА. В последние годы, однако, не только более четко выявились актуальные физические программы (исследования с нейтрино, изучение редких ядерных процессов с мезонами, играющих принципиальную роль в физике элементарных частиц и т.д.), но, что, по-видимому более важно, выкристаллизовались обширные комплексы очень крупных задач прикладного характера, для успешного осуществления которых необходимы интенсивности первичных пучков протонов $\approx 10 + 100$ мА при энергиях частиц в несколько сот МэВ (получение в крупных промышленных масштабах различных радиоактивных изотопов, создание высокоинтенсивных портативных фото-нейтронных источников, наработка ядерного горючего из ^{238}U и ^{232}Th и т.д.).

В связи с этим перед специалистами в области ускорителей встала проблема как изыскания возможных методов получения таких пучков, так и разработки проектов ускорительных установок с мощностью в десятки мегаватт.

Если опустить рассмотрение методов ускорения заряженных частиц с помощью электромагнитных полей сгустков этих же или других частиц, которые, по-видимому, в ближайшее время вряд ли удастся использовать для получения сверхмощных пучков, то остается провести

анализ возможностей двух основных типов ускорителей - релятивистского изохронного циклотрона и линейного ускорителя.

Необходимо с достаточно большой вероятностью определить, какой тип ускорителя наиболее подходит как с принципиальной, так и с практической (к.п.д., эксплуатационная надежность и др.) точек зрения для дальнейшего развития мезонных фабрик в направлении получения сверхсильноточных пучков заряженных частиц непрерывного действия.

Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ в течение последнего десятилетия ведет научно-исследовательскую работу по сильноточным циклическим ускорителям на энергию 700 + 900 МэВ.

В настоящем сообщении кратко перечислены основные теоретические и экспериментальные результаты и выводы из этих исследований. Даются также некоторые сравнения с результатами ряда работ с области линейных ускорителей.

Основным результатом выполненных к настоящему времени в Лаборатории научно-исследовательских работ является вывод об отсутствии принципиальных ограничений для создания на основе релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой ускорительной установки для ускорения протонов до энергии 700 + 800 МэВ с интенсивностью выведенного пучка вплоть до 100 мА.

Приведены основные проектные параметры такого ускорителя - суперциклотрона.

Известно, что наибольшие токи ускоренных пучков получены на ускорителях с непрерывным режимом работы - циклотронах и составляют при малых энергиях около 2 + 5 мА. Дальнейшее увеличение интенсивности в циклотроне с Ш-образным магнитом наталкивается на принципиальные ограничения, которые связаны с эффектами пространственного заряда пучка, а увеличение энергии при сохранении изохронизма - на необходимость введения параметрической устойчивости аксиальных колебаний.

Для ослабления этих ограничений в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1962 году был предложен новый

тип ускорителя - кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой^{/1/}, для которого теоретически, а затем экспериментально^{/2/} была доказана возможность совмещения изохронности замкнутых орбит и жесткой фокусировки в широком диапазоне энергий, а также возможность достижения необходимой плотности частиц в ускоряемом сгустке.

Основные результаты теоретических исследований сводятся к следующему^{/3/}. В магнитных полях вида

$$B_z = B(r) [1 + \epsilon F(r, \phi)], \quad (1)$$

(где ϵ - глубина вариации поля, $F(r, \phi)$ - периодическая функция r и ϕ), динамика движения частиц существенно отличается от движения в азимутально-симметричных полях. Основными отличиями являются:

а) увеличение допустимой энергии поперечных колебаний при фиксированной амплитуде (увеличение жесткости);

б) уплотнение импульсов ускоряемых частиц, которое сводится к увеличению диапазона значений импульса в заданном объеме магнитного поля;

в) ослабление связи между периодом обращения частиц на замкнутых орбитах и условиями устойчивости.

Эти теоретические выводы были подтверждены на двух моделях изохронного циклотрона со спиральной структурой магнитного поля^{х/}, построенных в Лаборатории.

На первой модели, имеющей неразрезные полюса магнита с уложенными на них спиральными шиммами была экспериментально подтверждена возможность циклотронного ускорения частиц без потерь в течение более чем 2000 оборотов.

^{х/} В обоих случаях использовалась спиральная структура магнитного поля, создаваемая либо спиральной формы железными шиммами, уложенными на полюса, либо токовыми обмотками, но всегда имеющими форму спирали Архимеда $r = N\phi\lambda$, $B_z(r, \phi) = B(r)[1 + \epsilon \sin(r/\lambda - N\phi)]$, (r - радиус, N - число спиралей, $2\pi\lambda$ - шаг спирали; r, ϕ, z - координаты в цилиндрической системе).

Вторая модель - секторный кольцевой электронный циклотрон с жесткой фокусировкой предназначалась для экспериментальной проверки влияния эффектов поперечного пространственного заряда, которые по современным представлениям являются основным фактором, ограничивающим плотность заряженных частиц в ускоряемом сгустке.

Соответствующая заданному среднему току J в циклотроне плотность пространственного заряда (κ) при эллиптическом поперечном сечении сгустка и равномерном распределении плотности определяется из выражения /4/

$$\kappa = \frac{8J}{e c \Delta_r \Delta_z \Delta_\phi \cdot \beta}, \quad (2)$$

где Δ_r , Δ_z , Δ_ϕ - радиальный, аксиальный и азимутальный размеры сгустка при пространственно разделенных по радиусу сгустках, что в кольцевых протонных циклотронах обычно имеет место при инжекции, β - относительная скорость частиц. Если для оценки величины κ_i при энергии инжекции возьмем

$$\Delta_r = \Delta_z = 1,4 \text{ см}; \quad \Delta_\phi = 1 \text{ рад } (\pm 30^\circ); \\ J = 100 \text{ мА}; \quad \beta_i = 0,314 \quad (W_i = 50 \text{ МэВ}),$$

то найдем, что $\kappa_i = 2,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ в момент инжекции.

Уменьшение частоты аксиальных колебаний из-за эффекта "поперечного" пространственного заряда можно найти из выражения

$$Q_{z0}^2 - Q_z^2 = \frac{4\pi \cdot r_p \cdot r_\infty^2 \cdot \kappa}{\gamma^3} \cdot \frac{\Delta_r}{\Delta_r + \Delta_z}, \quad (3)$$

где r_p - классический радиус ускоряемой частицы,

$$r_\infty = \frac{c}{2\pi \cdot f_0}, \quad f_0 \text{ - частота обращения сгустка.}$$

Если для оценки допустимой величины плотности ($\kappa_{\text{доп}}$) принять $Q_{z0} = 1,4$; $Q_z = 1,1$; $f_0 = 6,2 \text{ МГц}$; $\gamma_i = 1,05$; $r_p = 1,535 \cdot 10^{-16} \text{ см}$ (протон), то найдем $\kappa_{\text{доп}} = 1,52 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Если радиальные эмиттансы, соответствующие последовательным оборотам сгустков, перекрываются, то в формуле (2) в качестве Δ_r берется радиальный шаг за оборот ($\Delta_r = \frac{r_\infty \cdot eV_p}{\beta \gamma^3 \cdot E_0}$, умноженный на $4/\pi$, а в формуле (3) сомножитель $\frac{\Delta_r}{\Delta_r + \Delta_z} = 1$. В этом случае для конечной энергии протонов 800 МэВ при наборе за оборот 2 МэВ из (2), (3) получим $\kappa_K = 3,62 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$; $\kappa_{\text{доп}} = 4,17 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Эти оценки показывают, что токи протонов в сотни миллиампер достигают при значениях Q_z в диапазоне 1,4 + 1,8, которые обеспечиваются секторной структурой кольцевой магнитной системы, и в дальнейшем увеличении жесткости системы нет необходимости. Учет эффектов отражений и влияние соседних сгустков пучка изменяют эти результаты несущественно.

Критерием подобия для эффекта "поперечного" пространственного заряда при его исследовании на электронном циклотроне на конечных радиусах, где отсутствует разделение орбит, будет выражение

$$\frac{J_p}{J_e} = \frac{V_p \cdot f_p}{V_e \cdot f_e}, \quad (4)$$

где J_p , J_e - средний ток протонов и электронов; V_p , f_p и V_e , f_e - набор энергии за оборот и частота обращения для протонов и электронов, соответственно.

На электронном циклотроне с жесткой фокусировкой был достигнут ток 1 мА при $eV_e = 1,8 \text{ кэВ}$, $f_e = 40 \text{ МГц}$ и плотности $\kappa = 4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ /5/. В протонных ускорителях, если принять $f_p = 6 \text{ МГц}$, $eV_p = 2 \text{ МэВ}$, то, как это следует из (4), возможно получение токов вплоть до 200 + 300 мА без ограничения по эффекту "поперечного" пространственного заряда.

Предельная интенсивность пучка масштаба 100 мА при энергии до 1 ГэВ приводит к появлению ряда проблем специфического характера. К числу таких проблем в первую очередь относится задача стопроцентного вывода ускоренного пучка из камеры циклотрона, так как мощность пучка достигает сотни мегаватт.

Вследствие того, что ни одна из применяемых на циклотронах в настоящее время систем вывода пучка не могла обеспечить 100%-ный вывод ускоренных частиц, вопрос об использовании таких циклических ускорителей долгое время оставался проблематичным и предпочтение отдавалось линейным ускорителям. В 1963 году в качестве одного из вариантов решения проблемы вывода было предложено создание специального типа циклотрона (SOC)^{/6/}, в котором соседние орбиты во всем ускорителе разделены по радиусу на такое расстояние, что между ними можно поставить обычную отклоняющую выводную систему. Такое разделение орбит достигалось увеличением набора энергии за оборот до 30 + 60 МэВ и, соответственно, существенным увеличением высокочастотной мощности ускорителя до 40+60 мВт. Исследования по этому предложению проводились в нескольких лабораториях США, Канады и Англии в течение ряда лет, но конкретного проекта не появилось.

В 1972 году в Лаборатории ядерных проблем было обнаружено новое физическое явление - эффект расширения замкнутой орбиты, который проявляется только за счет определенного изменения (вдоль радиуса циклотрона) формы магнитного поля спирально-секторной структуры^{/7/}. Аналитические и численные расчеты показали, что при типичных параметрах секторного изохронного циклотрона в результате действия дополнительного, пространственно изменяющегося магнитного поля в области вывода соседние орбиты частиц разделяются только в этой области на необходимую величину (несколько сантиметров вместо долей миллиметра в области ускорения). Эффект основан на существенной зависимости

коэффициента расширения замкнутых орбит $\left(\frac{p}{L} \frac{dL}{dp}\right)$ от изменения амплитуды основной гармоники магнитного поля, где L -длина замкнутой орбиты. В магнитных полях типа (1) средний радиус замкнутой орбиты (\bar{r}) для частицы импульса p находится из выражения

$$p = e\bar{B} \cdot \bar{r} \cdot \lambda. \quad (5)$$

Параметр λ определяется периодической (с периодом $\frac{2\pi}{N}$) частью структуры магнитного поля (1) и в первом приближении имеет вид^{/7/}.

$$\lambda = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4N^2} \left(\frac{B_N}{\bar{B}}\right)^2 + \frac{\bar{r}}{2N^2} \cdot \frac{B_N}{\bar{B}^2} \frac{dB_N}{dr} \Big|_{r=\bar{r}}}, \quad (6)$$

где N -число секторов магнитной системы, \bar{B} -среднее магнитное поле, B_N -амплитуда основной гармоники.

Из (6) следует, что при выполнении неравенства $1,5 + \frac{\bar{r}}{B_N} \frac{dB_N}{dr} \leq 0$ имеет место уменьшение параметра λ и вследствие этого расширение замкнутой орбиты при незначительном изменении глубины вариации, поскольку коэффициент расширения в общем случае имеет вид

$$\alpha = \frac{p}{L} \frac{dL}{dp} = \left[1 + \frac{\bar{r}}{\bar{B}} \frac{d\bar{B}}{dr} + \frac{\bar{r}}{\lambda} \frac{d\lambda}{dr} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Из выражений (6), (7) следует, что при типичных параметрах секторных изохронных циклотронов, в статистическом режиме энергетическое разделение замкнутых орбит увеличивается в 20+50 раз. С помощью численных расчетов был исследован динамический режим этого эффекта. Было показано, что при определенных допусках на закон изменения вариации, эмиттансы пучка не искажаются и сохраняется увеличение энергетического шага орбиты в 20+50 раз. Разделение на несколько сантиметров орбиты в области вывода позволяют использовать обычный магнитный канал с ферромагнитной передней стенкой для отклонения 100% частиц с последней орбиты.

Специальный закон уменьшения глубины вариации магнитного поля в области вывода возможно реализовать с помощью дополнительных токовых обмоток в любом изохронном циклотроне с секторной структурой основного магнитного поля.

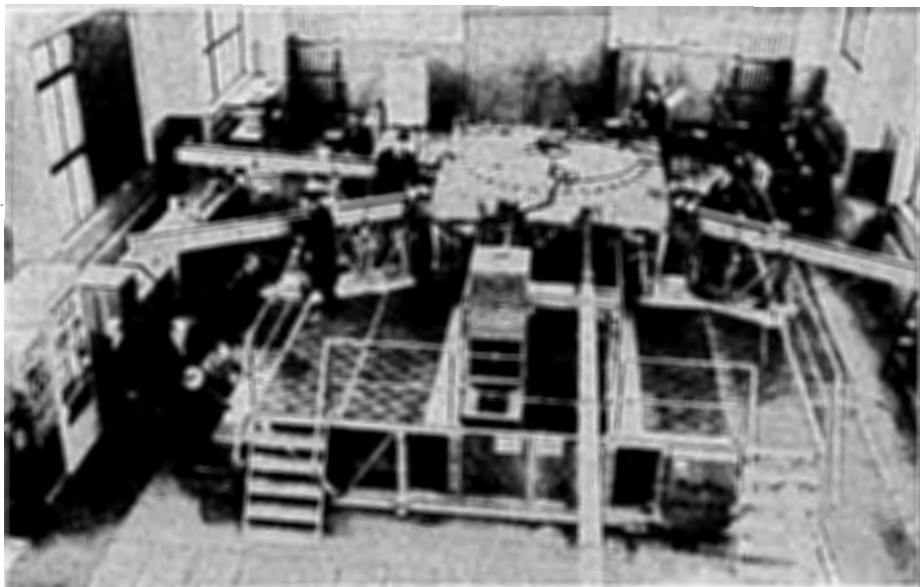


Рис. 1. Общий вид электронного кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой.

Для экспериментальной проверки существования эффекта расширения орбит был использован электронный кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой, действующий с 1967 года в Лаборатории ядерных проблем. Общий вид установки показан на рис. 1. Был проведен численный расчет эффекта расширения орбит при параметрах электронного циклотрона. На рис. 2 приведены результаты этого расчета. В верхней части рисунка изображена орбита в области уменьшения глубины вариации. Видно, что в течение оборота средний радиус замкнутой орбиты увеличивается примерно на 3 см. В нижней части показаны аксиальные колебания. Как видно, частота аксиальных колебаний увеличивается незначительно, благодаря специально выбранному закону изменения фазы вариации в области расширения.

На электронном циклотроне была установлена в зоне конечных радиусов дополнительная токовая обмотка,

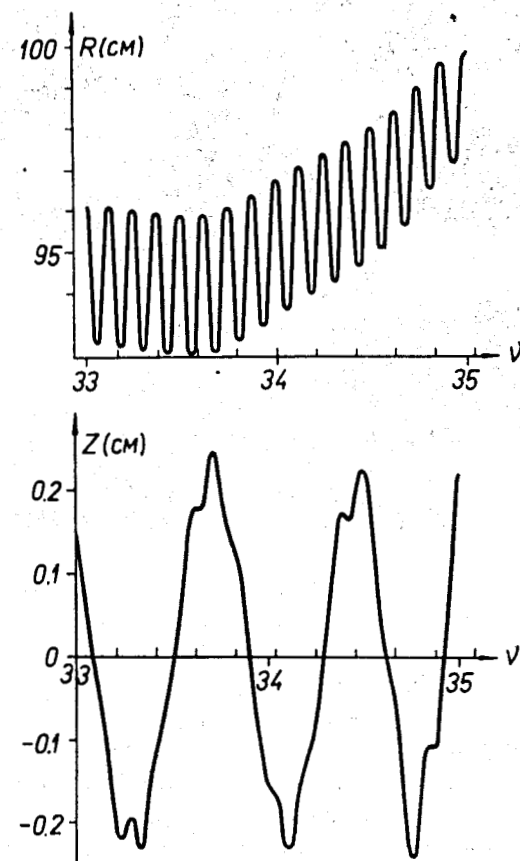


Рис. 2. Результаты типового расчета эффекта расширения замкнутой орбиты.

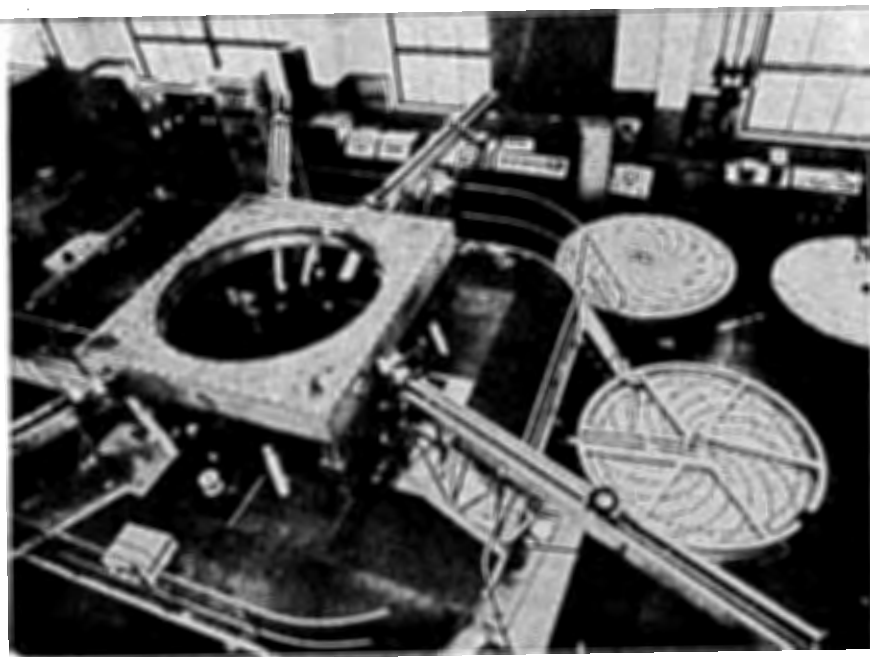


Рис. 3. Полюса электромагнита электронной модели с обмоткой для уменьшения вариации вдоль радиуса.

обеспечивающая необходимый закон вариации магнитного поля, и не искажающая среднее поле. На рис. 3 приведен общий вид электронного циклотрона в разобранном состоянии. На одной из крышек камеры видны на конечных радиусах дополнительные обмотки. На рис. 4 изображены схематически эти обмотки, а также зависимости среднего поля $\bar{H}(r)$ и глубины вариации $H_8(r)$ от радиуса при действии дополнительных обмоток (сплошной линией).

После запуска ускорителя в середине 1974 года экспериментально наблюдалось расширение орбиты [8]. Одна орбита электронов при включении дополнительной обмотки отделялась от остального сплошного сгустка примерно на 3 см. На рис. 5 показана зависимость тока от радиуса при расширенной орбите, а также вертикальный размер пучка до и после расширения орбиты. Так

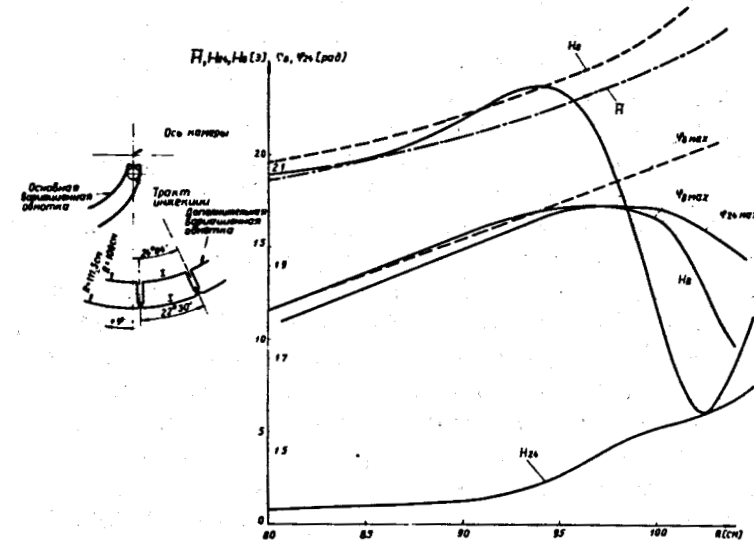


Рис. 4. Зависимость среднего поля $\bar{H}(r)$ и глубины вариации $H_8(r)$ от радиуса при действии дополнительных обмоток.

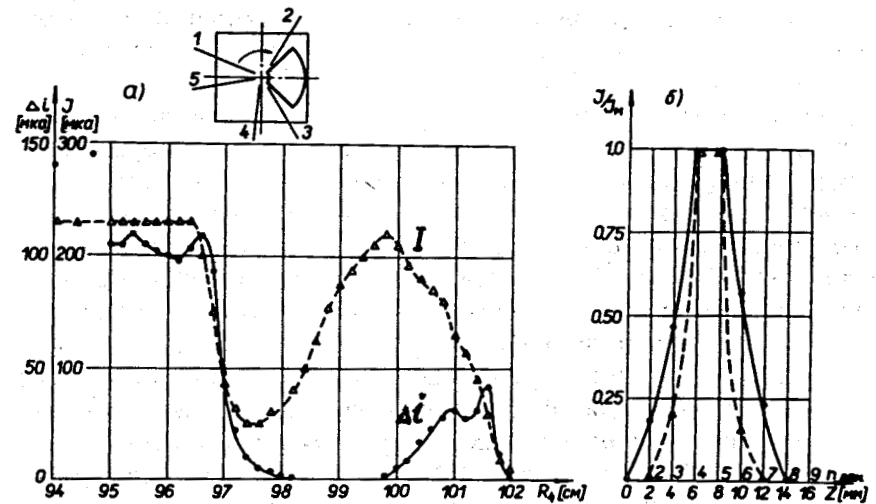


Рис. 5. Зависимость тока ускорителя от радиуса при расширенной орбите.

как расширение происходит в течение одного оборота, то сдвиг фазы, неизбежный в этом процессе, не нарушает ускорения. Таким образом, ликвидировано последнее принципиальное ограничение использования ускорителей с непрерывным режимом работы (релятивистских кольцевых циклотронов) для получения сверхсильноточных пучков протонов с энергией $700 + 800$ МэВ.

Следующей весьма важной проблемой для таких сильноточных ускорителей будет являться получение максимального коэффициента полезного действия. При мощностях в ускоренном пучке, составляющих $50 + 80$ МгВт, этот коэффициент будет целиком определяться высокочастотной мощностью, вклады же всех остальных энергетических систем (магнит, вакуумная система и др.) пренебрежимо малы. Коэффициент полезного действия современных ламповых генераторов в интересующем нас диапазоне частот составляет $70 + 75\%$ /9/. Высокочастотные потери в резонаторах при амплитуде ускоряющего напряжения $250 + 500$ кВ не превышают $75 + 300$ кВт, т.е. они дают относительно малый вклад в общий К.П.Д. Таким образом, К.П.Д. кольцевого изохронного циклотрона с жесткой фокусировкой должен быть близок к К.П.Д. высокочастотного генератора и составлять $60 + 70\%$.

Рассмотрим теперь кратко возможности использования для получения аналогичных параметров ускоренного пучка протонов линейных ускорителей непрерывного действия. Известно, что лучшие линейные протонные ускорители уже в настоящее время имеют импульсные токи до 200 мА /10/. Однако принципиальной особенностью линейного ускорителя является то, что ускоряющая система используется для ускорения данного сгустка один раз, а не сотни раз, как в циклическом ускорителе. Это неизбежно приводит к резкому увеличению мощности потерь, которые у таких ускорителей составляют $40 - 50$ мВт в импульсе /11/. При непрерывном режиме работы такие мощности потерь существенно скажутся на К.П.Д. всей установки.

Кроме того, необходимо иметь очень короткие импульсы ($\approx 0,07$ нс) в микроструктуре, для возможности перехо-

да в процессе ускорения с одной ускоряющей частоты (200 МГц) на другую (800 МГц), что приводит к сравнительно большим плотностям ускоряемых частиц в микросгустке. Эта плотность примерно в $5 + 7$ раз больше плотности сгустка в циклическом ускорителе при одинаковом среднем токе и при токе 100 мА составит в линейном ускорителе около $1,5 \cdot 10^9$ см⁻³. Поэтому система, обеспечивающая устойчивость ускоряемых сгустков, должна обладать большой жесткостью, чтобы компенсировать влияние пространственного заряда сгустков.

Как для циклических, так и для линейных ускорителей возникает проблема фазировки ускоряющих резонаторов при больших нагрузках током пучка. Эта проблема, по нашему мнению, также решается существенно легче для циклических машин по ряду причин: а) количество резонаторов в $50 + 100$ раз меньше; б) амплитуда ускоряющего напряжения в несколько раз ниже; в) собственная частота резонаторов ниже. Кроме того, в случае линейных ускорителей существует пока еще открытая проблема разработки достаточно мощных генераторных ламп или клистронов, работающих в непрерывном режиме, в диапазоне частот $700 + 800$ МГц.

Все вышеизложенные соображения были положены в основу выбора в качестве ускорителя для получения пучков протонов с энергией 800 МэВ и интенсивностью $10 + 100$ мА циклического кольцевого ускорителя с жесткой фокусировкой и непрерывным режимом работы - суперциклотрона /12/.

В табл. 1 приведены основные параметры суперциклотрона, а на рис. 6 приведена его схема. Отметим следующие особенности установки.

Как видно из рис. 6, ускоряющая система суперциклотрона состоит из четырех резонаторов такого же типа, как и в мезонной фабрике SIN, обеспечивающих ускоряющее напряжение на зазоре до 500 кВ. Чтобы уменьшить до минимума возможность возбуждения нежелательных колебаний в пучке от высокочастотного поля, резонаторы расположены вдоль радиусов, проведенных из центра машины.

Таблица 1

Энергия ускоренных протонов (МэВ)	800
Ток ускоренных протонов (мА)	10 + 100
Энергия инжектируемых протонов (МэВ)	50
Частота аксиальных колебаний	1,3 + 1,4
Частота радиальных колебаний	$1,9 > Q_r > 1,1$
Радиус инжекции (см)	240
Среднее поле на радиусе инжекции (Гс)	4270
Конечный радиус (см)	650
Среднее поле на конечном радиусе (Гс)	7500
Набор энергии за оборот (МэВ)	2,0
Частота обращения ионов (МГц)	6,2
Частота ускоряющего напряжения (МГц)	49,6
Число ускоряющих промежутков	4
Напряжение на резонаторе (кВ)	400 + 500
Высокочастотная мощность (МВт)	9 + 81
Число секторов	8
Диаметр магнита по ядру (см)	2200
Высота магнита (см)	720
Вес магнита (т)	5800
Мощность питания магнита (кВт)	1750
Мощность ВЧ потерь в резонаторах (кВт)	1000
Мощность пучка (МВт)	8 + 80
Коэффициент вывода пучка из камеры (%)	100
Потери интенсивности пучка в процессе ускорения	10^{-4}

Такое наиболее оптимальное расположение ускоряющей системы привело к специфическому положению секторов магнитной системы. Чтобы обеспечить необходимую спиральность ($\alpha = 41^\circ$) на конечных радиусах и поместить секцию между резонаторами, форма секций магнитной системы выбрана такой, что на $r = 400$ см ($W = 160$ МэВ) касательные к образующим секторов направлены по радиусам (структура Томаса), на больших

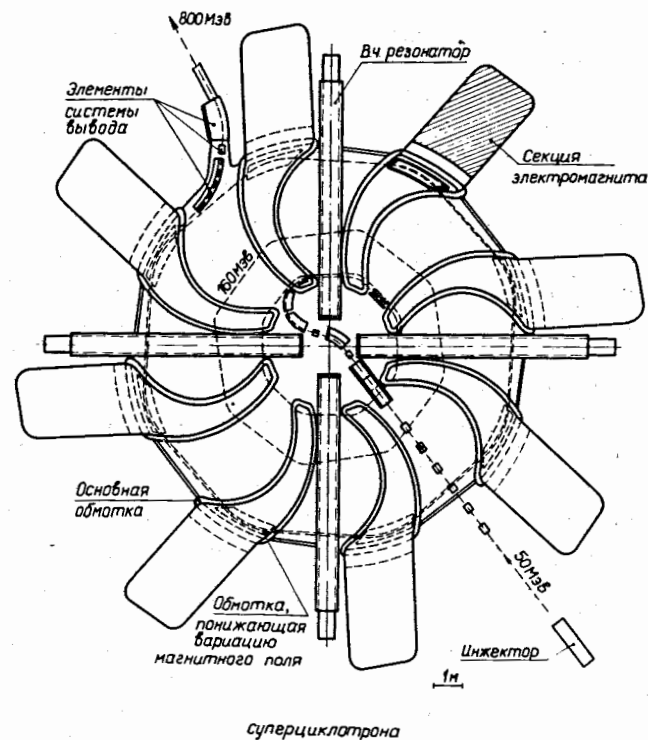


Рис. 6. Схема суперциклотрона.

радиусах угол спирали имеет положительную величину, а на меньших - отрицательную ($\alpha = -62^\circ$ на радиусе инжекции). Угловая протяженность секции изменяется от $13,7^\circ$ на радиусе инжекции ($r_i = 240$ см) до 10° на $r = 400$ см и до $18,5^\circ$ на конечном радиусе $r_k = 650$ см. Магнитное поле в медианной плоскости вдоль средней линии секции изменяется от 10700 Гс на радиусе инжекции до 16800 Гс на $r = 400$ см и затем остается неизменным до конечного радиуса. Такие пара-

метры магнитной системы обеспечивают на всех радиусах величину частоты аксиальных колебаний в диапазоне $Q_z = 1,34 \pm 1,4$.

В зоне конечных радиусов на рис. 6 условно изображены обмотки, создающие необходимое для расширения орбиты уменьшение вариации магнитного поля.

Тракт инжекции пучка с энергией 50 МэВ проходит от линейного ускорителя ниже (или выше) зазора магнита кольцевого ускорителя, занятого ускоренным пучком, затем пучок двумя поворотными магнитами переводится в медианную плоскость и далее вводится в кольцо магнитным и электрическим инфлекторами. Шаг за оборот при инжекции составляет около 1,5 см (на наборе энергии за оборот - 2 МэВ), что достаточно для обхода пластины инфлектора.

В качестве инжектора необходим линейный ускоритель на энергию 50 МэВ, работающий на частоте ≈ 50 МГц. Наиболее подходящим, по-видимому, является линейный ускоритель на основе Н-резонатора с высокочастотной квадрупольной фокусировкой и непрерывным режимом работы^{13/}. При том же поперечном размере и одинаковом темпе ускорения Н-резонатор работает на волне в 3 + 4 раза длиннее, чем обычный резонатор Альвареца. Несколько модифицируя начальную часть такого линейного ускорителя (применяя двойной Н-резонатор), можно начать ускорение с энергии 100 кэВ, т.е. непосредственно от дуоплазмотрона без форинжектора. Результаты теоретических расчетов и модельных экспериментов с линейными ускорителями на Н-волне позволяют надеяться, что на этой основе может быть разработан инжектор для суперциклотрона с необходимыми параметрами.

Таким образом, представляется вполне реальным начать уже в ближайшее время необходимые проектные исследования (численные расчеты конкретного варианта, моделирование отдельных систем и узлов и т.д.) для создания технического проекта суперциклотрона.

Здесь абсолютно не затронут большой и важный круг вопросов, касающихся разводки пучков, защиты

и управления ускорителем, так как основная цель данного сообщения - показать, что на пути создания такой установки принципиальные физические запреты отсутствуют, а в экономическом отношении суперциклотрон выгодно отличается от линейного ускорителя с той же мощностью пучка.

Литература

1. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-13, (4), p. 215, (1966).
2. В.Н.Аносов, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов и др. АЭ, 25, 539 (1968).
3. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. УФН, 85, 651 (1965).
4. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др. ЖЭТФ, 57, 1465 (1969).
5. А.А.Глазов, В.П.Джелепов и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-6214, Дубна, 1972.
6. F.M.Russell. Nucl. Instr. and Meth., 23, p.229 (1963).
7. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. Сообщение ОИЯИ, Р9-6733, Дубна, 1972.
8. А.Т.Василенко, А.А.Глазов, В.П.Джелепов и др. Сообщение ОИЯИ, Е9-8443, Дубна, 1974.
9. K.L.Erdman, R.Poirier, O.K.Fredriksson, S.F.Welton, W.A.Grundman. Sixth Intern. Cyclotron Conf. Vancouver (1972).
10. И.М.Капчинский, В.А.Баталин, А.А.Коломиец, Б.К.Кондратьев, Р.П.Куйбида. ПТЭ, 5, 17 (1972).
11. D.C.Hagerman, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-13 (4), p.277 (1966).
12. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга. Сообщение ОИЯИ, Р9-7833, Дубна, 1974.
13. В.А.Тепляков, А.П.Мальцев, В.Б.Степанов. ИФВЭ, ИНЖ-69-2, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 июля 1975 года.