

РАЗВИТИЕ ЦИКЛОТРОННОГО МЕТОДА УСКОРЕНИЯ

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ И МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЦИКЛОТРОНЫ

Б. И. ЗАМОЛОДЧИКОВ

ОИЯИ, Дубна

Циклотрон последние 10—15 лет переживает новый период своего развития. Это обусловлено введением в структуру магнитного поля периодической вариации, сначала только азимутальной [1], а потом и спиральной [2].

Вариация магнитного поля позволила существенно повысить достижимую в циклотроне энергию. За последнее десятилетие было сооружено или начато сооружение многих установок на энергию до 100 Мэв. Нет сомнений, что циклотронный метод ускорения позволит также получить пучки протонов с энергией до 700—800 Мэв высокой интенсивности (до нескольких миллиампер) и на их основе создать исследовательские комплексы, получившие название «мезонных фабрик». В этой области применения релятивистских циклотронов они конкурентно-способны с линейными ускорителями, обеспечивая лучшее качество пучков при меньших затратах, хотя и требуют специальных мер для вывода пучка.

В свое время было предложено несколько проектов «мезонных фабрик». В настоящее время к реализации приняты два из них: кольцевой изохронный циклотрон в Цюрихе и H^- -циклотрон «TRIUMF» в Канаде. Все эти проекты широко обсуждались.

Как представляется в настоящее время, в дальнейшем развитии циклотронного метода перспективными могут явиться два направления:

1. Создание релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой на энергию протонов до 1 Гэв с интенсивностью до 100 миллиампер и более для «интенсивного нейтронного генератора» и может быть некоторых прикладных применений.

2. Создание изохронного циклотрона на энергию по протонам до 100—200 Мэв с высокой степенью моноэнергетичности ускоряемого пучка.

ка $\frac{\delta w}{w} \sim 10^{-4}$, в дальнейшем называемого моноэнергетическим циклотроном, для исследований атомного ядра.

Релятивистский циклотрон с жесткой фокусировкой

Предельная интенсивность пучка ускоренных частиц, ограничиваемая действием вертикальной составляющей электрического поля пучка, в релятивистском циклотроне может быть оценена из выражения:

$$i_{\max} = \frac{(Q_z^2 - Q_{zp}^2) \Delta \theta \cdot \Delta z \cdot f \cdot \Delta E}{4\pi e}, \quad (1)$$

т. е. пропорциональна $(Q_z^2 - Q_{zp}^2)$ и набору энергии за оборот ΔE . Здесь Q_z — частота вертикальных колебаний, определяемая магнитной фокусировкой, без учета действия объемного заряда. Предполагается, что $Q_z = \text{const}$ на всех радиусах; Δz — высота пучка; $\Delta \theta$ — азимутальная протяженность пучка; f — частота обращения; Q_{zp} — значение частоты вертикальных колебаний, до которого желательно или возможно допустить уменьшение частоты вертикальных колебаний вследствие эффекта пространственного заряда.

Уже при $Q_z = 0,2 \div 0,3$ может быть достигнута интенсивность порядка 10 ма, т. е. вполне достаточная для «мезонной фабрики». Дальнейшее существенное повышение интенсивности в релятивистском циклотроне может быть достигнуто путем увеличения «жесткости» фокусирующей системы. Так, например, при $Q_z = 1,3 \div 1,4$, т. е. в случае использования жесткофокусирующей системы ($Q_{z,r} > 1$) предельная интенсивность может составлять 100 ма и более. Такие значения Q_z при использовании спиральной вариации магнитного поля могут быть получены. Так как в циклотроне Q_z в центре (при $r=0$) всегда близко к нулю и только на некотором радиусе достигает требуемого значения, необходимо центральную область исключить из процесса циклотронного ускорения и инжектировать предварительно ускоренные ионы на некоторый начальный радиус.

Эти соображения послужили отправным моментом для исследования возможности создания релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой для получения пучка ускоренных протонов с интенсивностью до 100 ма [3].

В таблице 1 указаны примерные его параметры, которые, однако, не являются результатом какой-нибудь проектной проработки и приведены для иллюстрации размеров такого ускорителя, который, как видно, не очень сильно отличается по масштабам от больших синхроциклотронов.

В качестве ускоряющей системы удобно использовать резонаторы, вертикально размещаемые в промежутках между магнитными секторами. Что касается инжектора, то выбор ограничен двумя возможностями.

ми: линейный ускоритель или изохронный циклотрон. Структура пучка от последнего, по-видимому, является наиболее благоприятной для его инжекции в релятивистский циклотрон.

Совершенно очевидны некоторые физические и технические аспекты проблемы, разрешение которых является необходимой предпосылкой реализации возможных проектов; другие задачи возникнут при более детальной разработке такого ускорителя.

В ряду таких проблем можно назвать: а) динамика пучка при высокой плотности заряда в нем; б) разработка высокочастотной системы циклотрона на непрерывную мощность свыше 50 Мвт; в) разработка интенсивного ускорителя-инжектора; г) разработка высокоэффективного вывода пучка из ускорителя; д) обеспечение радиационной защиты, а также радиационной стойкости конструкций и другие.

Для экспериментального исследования некоторых из этих задач в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ создана электронная модель релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой [4]. Использование электронов позволяет провести моделирование протонного ускорителя во всем диапазоне скоростей на сравнительно небольшом (по сравнению с моделируемым ускорителем) приборе.

Для динамического подобию эффектов «поперечного» пространственного заряда при моделировании требуется:

$$Q_{ze} = Q_{zp}, \quad \beta_e = \beta_p, \quad \Delta Q_z(i_e) = \Delta Q_z(i_p). \quad (2)$$

ΔQ_z — изменение частоты аксиальных колебаний, индекс «е» относится значения к электронной модели, а индекс «р» — к моделируемому протонному ускорителю.

Магнитное поле, описываемое в плоскости симметрии выражением

$$H_z = H(r)[1 + \varepsilon(r)\sin(2\pi r/\lambda - N\theta)], \quad (3)$$

в электронном аналоге создается с помощью симметрично расположенных относительно медианной плоскости токовых обмоток: концентрических и вариационных. Средняя напряженность поля изменяется от 14 до 26 эрстед в интервале радиусов от 18 до 101 см. Спиральная вариация обеспечивает получение постоянного вдоль радиуса значения Q_z до 1,4. При токе электронов 1–1,5 ма моделируется динамика протонного пучка с интенсивностью 100 ма и более.

Ускоряющая система представляет резонансную четвертьволновую линию с 90° дуантом. Специально разработанная инжекция пучка электронов с энергией 5,8 кэв позволяет получить предельные плотности ускоряемого пучка в фазовом объеме.

На рис. 1 представлен общий вид электронного ускорителя.

Первые экспериментальные исследования на модели касаются динамики пучка. На рис. 2 приведена зависимость тока пучка от радиуса.

Полученный результат показывает, что достигнутая на электронной модели циклотрона интенсивность ускоренного электронного пучка уже соответствует протонному току 60 ма и при этом не наблюдается

нарушение процесса ускорения из-за каких-либо дополнительных эффектов, связанных с пространственным зарядом. В дальнейшем на электронной модели будут проводиться более детальные исследования пучка, а также экспериментальное изучение вывода пучка.

Следует заметить, что выражение (1), по которому оценивалась предельная интенсивность релятивистского циклотрона, содержит предположение, что нет радиального разделения сгустков ускоряемых частиц.

Повышая набор энергии за оборот, можно достичь разделения орбит в релятивистском циклотроне даже на конечном радиусе. Безусловно, при этом упрощается вывод пучка из ускорителя. Но очевидно также, что уже при разделении первых орбит предельная интенсивность практически становится независимой от дальнейшего повышения ускоряющего напряжения.

Подход к созданию высокоинтенсивного циклотрона, характеризующийся стремлением к разделению орбит на конечном радиусе, содержится в предложении М. М. Гордона по изохронному циклотрону с разделенными траекториями (STIC) [5], которое в отличие от широко обсуждающегося циклотрона с разделенными орбитами (SOC), предложенного в свое время Ф. М. Расселом, предусматривает использование изохронного поля с вариацией, но без дополнительных внутренних фокусирующих элементов. Однако, для полного разделения сгустков на конечном радиусе требуется очень большой набор энергии за оборот (свыше 10 МэВ), а это ведет к значительному увеличению потерь в ВЧ-системе со всеми вытекающими из этого трудностями.

Моноэнергетический циклотрон

За последние годы сильно вырос интерес к исследованиям атомного ядра с помощью пучков заряженных частиц, обладающих высокой степенью моноэнергетичности. Этому в значительной степени способствовали успехи в развитии электростатических тандем-генераторов, на которых можно получить пучки частиц с энергетическим разбросом порядка 10^{-4} при плавной регулировке энергии в диапазоне до 20—25 МэВ.

Однако можно предполагать, что намечающемуся росту требований к энергии и интенсивности пучка ускоренных частиц электростатические тандем-генераторы не смогут полностью удовлетворить, если даже считать, что в ближайшие годы удастся достичь на них энергии 40—45 МэВ при интенсивности до 1 микроампера.

Меры по монохроматизации уже выведенных пучков частиц с помощью анализирующих магнитов, предпринимаемые на некоторых действующих и сооружаемых циклотронах, связаны с очень большой потерей интенсивности и увеличением фона и не позволяют решить задачу.

В связи с такой ситуацией и рассматривается вопрос о возможно-

сти достижения требуемой моноэнергетичности частиц еще в процессе ускорения (как это имеет место в электростатических генераторах) и на других типах ускорителей. При этом имеется ввиду достижение более высоких значений (по сравнению с тандем-генераторами) энергии частиц и их интенсивности (100 и выше Мэв, 100 и более мка). Как показывает анализ, в пределах доступных в настоящее время решений только в изохронном циклотроне представляется возможным создать условия, обеспечивающие требуемую степень моноэнергетичности ускоряемых частиц, энергию и интенсивность.

Ограничение энергетического разброса ускоряемых в циклотроне ионов до 10^{-4} возможно достичь, обеспечивая одинаковое число оборотов ионов сгустка в процессе ускорения и равный набор энергии каждым ионом сгустка за один оборот.

Одним из необходимых условий энергетического разрешения является ограничение амплитуд свободных радиальных колебаний: они должны быть такими, чтобы обеспечить полное разделение смежных сгустков частиц на всех радиусах ускорения. Ограничение на амплитуду радиальных свободных колебаний приводит к необходимости внешней инжекции ионов в ускоритель при энергии, достаточной для получения требуемого эмиттанта пучка при токе ионов порядка 100 мка.

Другим условием является стабильность режима ускорения, т. е. поддержание постоянства магнитного поля и набора энергии во времени с точностью лучшей, чем 10^{-4} .

Исходя из таких представлений в Лаборатории ядерных проблем [6], и в других физических лабораториях (Физический институт АН СССР совместно с НИИФА им. Д. В. Ефремова [7], университет в Индиане, США [8]; Центр ядерных исследований в Карлсруэ, ФРГ) были начаты разработки моноэнергетических циклотронов*.

Основные особенности такого циклотрона и требования, предъявляемые к отдельным его параметрам и системам, можно представить по работам ОИЯИ, относящимся к обсуждаемому предмету, краткий обзор основных результатов которых ниже будет сделан.

Требования к пучкам частиц формулировались следующим образом:

1. Ускоряемые частицы	p	d	α	^3He	^6Li
2. Максимальная энергия Мэв	80	60	120	120	180
3. Диапазон изменения энергии	$(0,25-1,0) W_{\text{max}}$				
4. Энергетический разброс	10^{-4}				
5. Ток пучка (протоны), мка	100				

Магнитное поле. Для обеспечения достаточного разделения орбит с учетом возможного эмиттанта инжектора и набора энергии за оборот, необходимо в рассматриваемом циклотроне использовать магнитное по-

* Н. G. Blosser, M. M. Gordon рассматривали возможность получения энергетического разброса пучка $\pm(1 \div 0,25) \times 10^{-3}$ на циклотронах с энергией $40 \div 200$ Мэв для инжекции в FFAG синхротрон [9].

ле с пониженным средним значением напряженности. Так, в проекте ОИЯИ это значение на конечном радиусе (равном 400 см) составляет 3296 э при ускорении протонов. В таком случае практически единственно целесообразным является использование секционированной магнитной системы. В этом случае возможно получить достаточно сильную аксиальную фокусировку (Q_z близкое к единице) без введения спиральности в структуру магнитного поля.

Как будет видно из дальнейшего рассмотрения, по условиям размещения элементов ускоряющей системы требуется, чтобы число секторов было равно четырем. Схема магнитной системы представлена на рис. 3.

В то же время такая система наилучшим образом соответствует задаче вывода пучка разных энергий, который можно осуществить с различных радиусов ускорения, т. е. плавно изменять в широком диапазоне энергию выведенных частиц без какой-либо перестройки магнитного поля и ускоряющей системы.

В моноэнергетическом циклотроне требования на допустимые отклонения магнитного поля от резонансного закона оказываются более жесткими, чем в релятивистском циклотроне, и не должны бы без специальных мер превышать 3×10^{-5} . Очевидно, что нужно контролировать положение центра сгустка относительной кривой ВЧ—напряжения и осуществлять соответствующую коррекцию среднего магнитного поля в некотором количестве точек вдоль радиуса. В таком случае допустимое $\frac{\Delta H}{H_0}$ составит 10^{-4} и это вполне реализуемо.

Ускоряющая система. Для расширения фазовой протяженности ускоряемого сгустка частиц, необходимо сгладить вершину кривой эквивалентного ускоряющего напряжения, например, введением третьей гармоники:

$$V = V_0(\cos \omega t - \delta \cos 3\omega t) \quad (5)$$

Если $\delta = \frac{1}{9}$, то $\frac{\Delta V}{V} \approx \pm 10^{-4}$ в диапазоне изменения фаз приблизительно $\pm 10^\circ$. Третья гармоника ускоряющего напряжения может быть создана с помощью дополнительных ускоряющих электродов.

Так как адиабатическое затухание свободных радиальных колебаний в моноэнергетическом циклотроне незначительно, необходимо практически полностью исключить причины роста их амплитуды в процессе ускорения. Наиболее существенными из этих причин являются резонансы, обусловленные отклонениями магнитного поля от идеального, а также воздействие ускоряющей системы на радиальное движение.

Влияние неточностей магнитного поля подробно изучалось при разработке изохронных циклотронов, и результаты должны учитываться в данном случае.

Острая чувствительность параметров выведенного пучка к амплитуде радиальных колебаний вынуждает тщательно рассмотреть и воздей-

ствие ускоряющей системы. Выводы из такого исследования [10] можно резюмировать следующим образом.

Влияние ускоряющей системы на радиальные колебания исключается, если система ускоряющих импульсов на ускоряющих щелях основных дуантов (или резонаторов) не содержит первых и вторых гармоник разложения в ряд Фурье на обороте, а система импульсов дополнительных дуантов (резонаторов) — первых гармоник.

Исходя из этого, в проекте ОИЯИ принята следующая схема ускоряющей системы:

Два основных ускоряющих электрода имеют угловую протяженность 90° и расположены в противоположных квадрантах так, что ускоряющие щели идут вдоль радиуса по осям смежных магнитных секторов. Рабочая частота соответствует второй кратности частоты обращения. Electroды являются частью четвертьволнового отрезка горизонтальной резонансной линии. Два дополнительных электрода расположены в двух свободных промежутках между магнитными секторами, имеют угловую протяженность 30° . Каждый дополнительный электрод является частью внутреннего стебля вертикальной полуволновой короткозамкнутой резонансной линии.

Схема ускоряющей системы представлена на рис. 3.

На моноэнергетичность частиц помимо стабильности амплитуды и частоты напряжения на электродах влияют и другие факторы: а) нарушение необходимого фазового соотношения между напряжениями основных и дополнительных электродов; б) нарушение номинального соотношения между амплитудами напряжения на основных и дополнительных электродах; в) изменение нагрузки; г) взаимодействие пучка с ускоряющими резонаторами.

Исследование всех этих факторов [11] позволило сформулировать требования к элементам высокочастотной системы, которые, не являясь практикой настоящего времени в ускорительной и высокочастотной технике, не выходят за пределы уже достигнутых технических возможностей. На рис. 4 представлена блок-схема высокочастотного питания.

Эффекты пространственного заряда пучка. Поперечные эффекты пространственного заряда определяют необходимые значения частот свободных колебаний, обеспечивающих устойчивость движения при токе ионов около 100 ма. Влияние азимутальной составляющей электрического поля пространственного заряда сгустка необходимо тщательно исследовать. Как показывают расчеты [12], разность потенциалов концов сгустка от его заряда в статическом случае не превышает несколько сот вольт. Имеющиеся предварительные экспериментальные данные указывают на незначительное влияние продольного поля сгустка на разброс энергии в пучке.

Инжекция. Минимальная энергия инъекции в основном определяется условиями формирования магнитного поля на радиусе инъекции, и, по-видимому, не может быть много меньше 1 Мэв. Жесткие требо-

вания на энергетическую однородность инжектируемого пучка ($\sim 10^{-3}$) и его эмиттанс (~ 1 см. мрад) ограничивают выбор инжектора электростатическими ускорителями. В проекте ОИЯИ рассматривается в качестве инжектора электростатический генератор Ван-де-Графа на энергию до 1,5 Мэв [13]. Если выполнить формирование импульсом тока до инжектора [14], то возможности этого генератора удовлетворяют требованиям моноэнергетического циклотрона и по интенсивности.

Вывод пучка. Из самой идеи рассмотренной схемы моноэнергетического циклотрона вытекает, что для вывода частиц должно быть использовано устройство, состоящее из электростатического дефлектора и расположенного через четверть оборота отклоняющего магнита, поворачивающих траекторию частиц на 90° [6]. Отклоняющий магнит размещается в одном из промежутков между магнитными секторами внутри одного из основных дуантов и перемещается вдоль радиуса таким образом, что траектория выведенного пучка остается неизменной при выводе частиц различной энергии.

Основные параметры моноэнергетического циклотрона ОИЯИ (МЦ) приводятся в таблице II.

Система автоматического управления. Большое количество параметров, определяющих успех работы моноэнергетического циклотрона, делает ручное управление практически невозможным. Проектом ОИЯИ предусматривается автоматическая управляющая система [15], состоящая из цифрового программатора режимов и аналоговых корректирующих устройств. Структурная схема этой системы приведена на рис. 5.

Таблица 1

Параметры релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой

1. Энергия ускоренных протонов	810 Мэв
2. Ток ускоренных протонов	65 Ма
3. Энергия инжектируемых протонов	50 Мэв
4. Конечный радиус ускорения	640 см
5. Среднее значение напряженности на конечном радиусе	7679 э
6. Радиус инжекции	250 см
7. Среднее значение напряженности на радиусе инжекции	4340 э
8. Число магнитных секторов	8
9. Частота аксиальных колебаний	1,35—1,4
10. Частота радиальных колебаний	1,07—2,0
11. Частота обращения ионов	6,3 МГц
12. Частота ускоряющего напряжения	25,2 МГц
13. Число резонаторов	4
14. Набор энергии за оборот	0,6—2,0 Мэв
15. Апертура ускоряющих щелей	10 см
16. Диаметр магнитной системы	1700 см
17. Высота магнитной системы	600 см
18. Высота зазора электромагнита	20 см
19. Вес магнитной системы	6000 т
20. Мощность питания магнитной системы	4000 кВт
21. Мощность потерь в резонаторах	~ 500 кВт
22. Мощность пучка	53 Мвт
23. Азимутальная протяженность пучка	0,5 рад

Таблица II

Параметры моноэнергетического циклотрона (МЦ)

1.	Ускоряемые частицы	P	d	α	^3He	^6Li
2.	Максимальная энергия, Мэв	80	60	120	120	180
3.	Диапазон изменения энергии выведенного пучка	$(0,25 \div 1,0)W_{\max}$				
4.	Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-4}$				
5.	Интенсивность выведенного пучка (протоны), мка	100				
6.	Средняя напряженность на конечном радиусе, э	3292	3985	3960	3460	3967
7.	Напряженность поля в центре, э	3037	3861	3837	3317	3844
8.	Средний радиус конечной орбиты, см	400				
9.	Средний радиус орбиты при инжекции, см	54				
10.	Энергия инжектируемых ионов, Мэв	1,29	1,045	1,045	1,03	1,043
11.	Частота свободных колебаний:					
	аксиальных	$0,8 \div 0,9$				
	радиальных	$1,07 \div 1,17$				
12.	Частота обращения, Мгц	4,638	2,948	2,948	3,377	2,948
13.	Кратность частоты ускоряющего напряжения	2				
14.	Число основных дуантов	2				
15.	Амплитуда ускоряющего напряжения на основных дуантах, кв	55				
16.	Число дополнительных дуантов	2				
17.	Набор энергии за оборот, кэв	200				
18.	Шаг орбит на конечном радиусе, см	0,44	0,6	0,6	0,6	0,6
19.	Количество секторов магнитной системы	4				
20.	Вес магнитной системы, т	1000				
21.	Высота зазора электромагнитов, см	16				
22.	Максимальная мощность питания электромагнитов, квт	1500				
23.	Мощность потерь в ВЧ-системе, квт	140				

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Thomas, Phys. Rev., 54, 580, 1933.
2. D. Kerst et. al., Bull. Amer. Phys. Soc., 30, No. 1, 1955.
3. В. П. Дмитриевский, О предельной энергии частиц в ускорителях типа циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Отчет ОИЯИ, 1955.
3. В. П. Дзелепов, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолодчиков, В. В. Кольга. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-13, 4, 215, 1966.
4. В. М. Аносов и др., Препринт ОИЯИ P9-3787, Дубна, АЭ, 6, 539, 1968.
5. M. M. Cordon, Nucl. Instr., 58, 2, 1968.
6. А. А. Глазов и др. Препринт ОИЯИ P9-3932, Дубна, 1968.
7. И. Я. Барит и др. Препринт ФИАН СССР № 15, Москва, 1969.
8. 200 MeV Multiparticle Multiple-Stage Syclotron a Proposal to US NSF, Department of Physics, Indiana University, 1968.
9. H. C. Blosser, M. M. Cordon, Nucl. Instr., 13, 2, 1961.

10. В. П. Дмитриевский, В. В. Кольга, Н. И. Полумордвинова, Материалы рабочего Совещания по Моноэнергетическому циклотрону, ОИЯИ, 13-4496. Дубна, 1969, стр. 36.
11. А. А. Глазов, В. А. Кочкин, Л. М. Онищенко, там же, стр. 55.
12. В. П. Дмитриевский, В. В. Кольга, Н. И. Полумордвинова, там же, стр. 46.
13. Г. И. Бацких, Г. И. Кленов, там же, стр. 19.
14. А. А. Глазов, Д. Л. Новиков, Л. М. Онищенко, там же, стр. 28.
15. Ю. Н. Денисов, А. Н. Любенко, П. Т. Шишлянников, там же, стр. 104.

ДИСКУССИЯ

Erdman: Has the problem of activity with 65 ma current been considered? With 100% extraction in the TRIUMF project the estimated level at outer wall of the vacuum tank is 5R per hour after the machine has been shut down for 2 days.

Замолодчиков: В ОИЯИ проблема радиационной стойкости материалов изучалась для ускорителя с током 1 мА и на этом уровне не встретилось непреодолимых трудностей. При больших токах все становится, конечно, сложнее.

Livingston: What is the status of plans for building such a monoenergy cyclotron as you described?

Замолодчиков: Проводятся исследования на моделях магнитной и ВЧ-систем. Разрабатываются элементы систем контроля за положением пучка в процессе ускорения.

Erdman: Concerning the problem of monoenergetic cyclotron, the TRIUMF project has succeeded applying the 3-d harmonic of the RF on the cavity. Because of the special nature of the cavity this did not prove difficult. This means that as well as a meson factory we have the possibility of an energy resolution of $\pm 5 \times 10^{-5}$ or ± 25 KeV in 500 MeV.

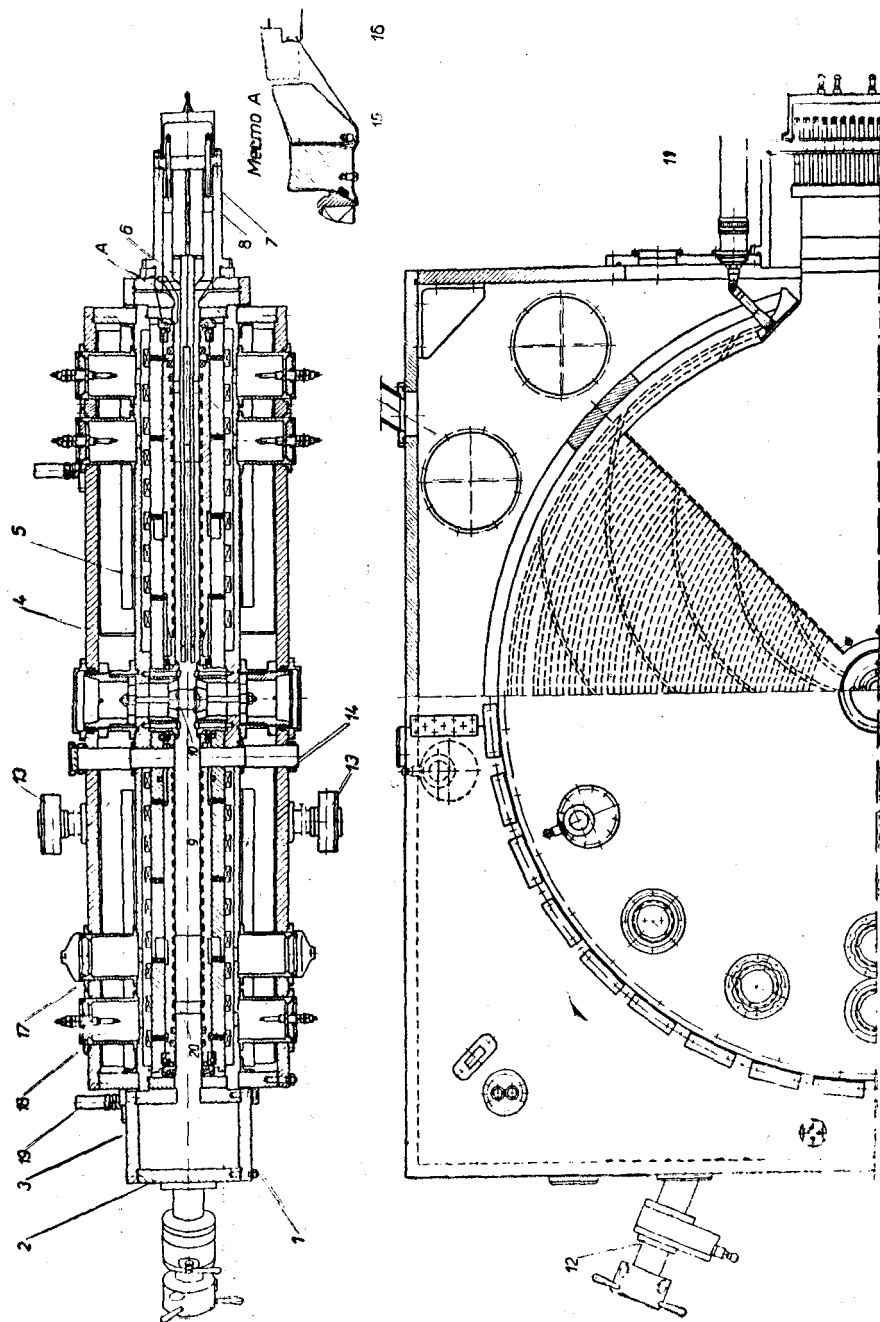


Рис. 1

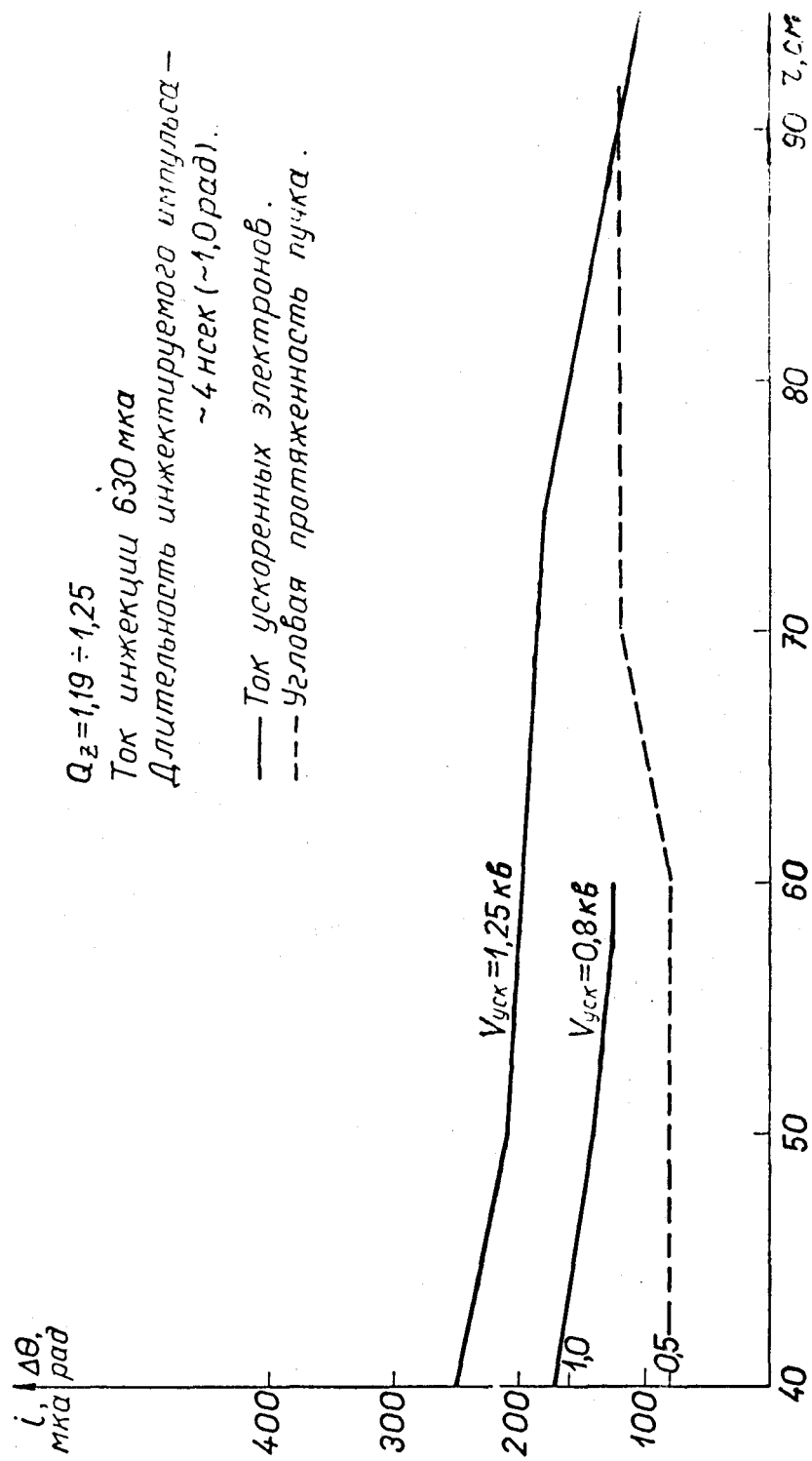


Рис. 2.

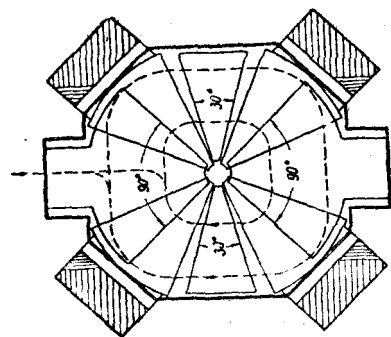


Рис. 3.

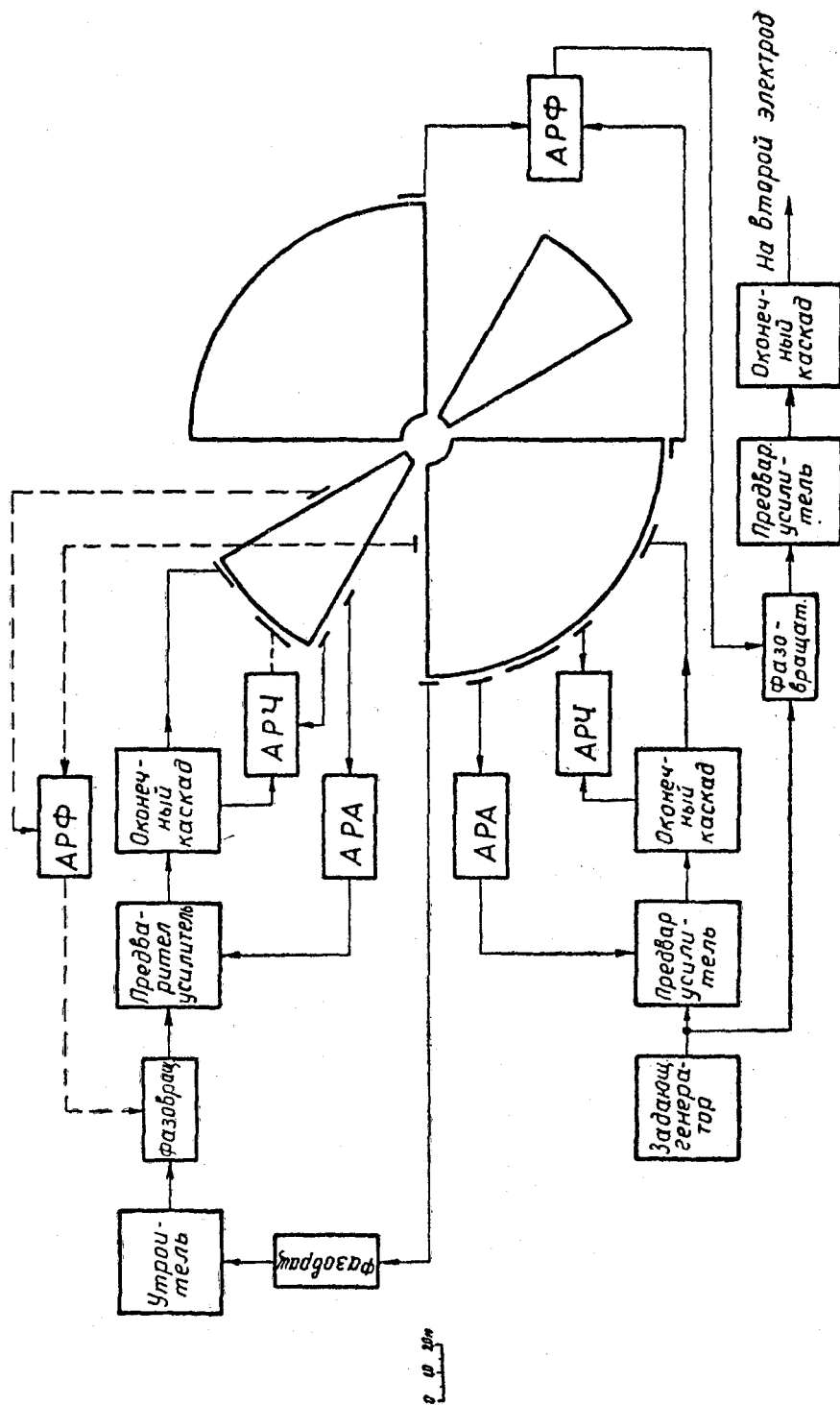


Рис. 4.

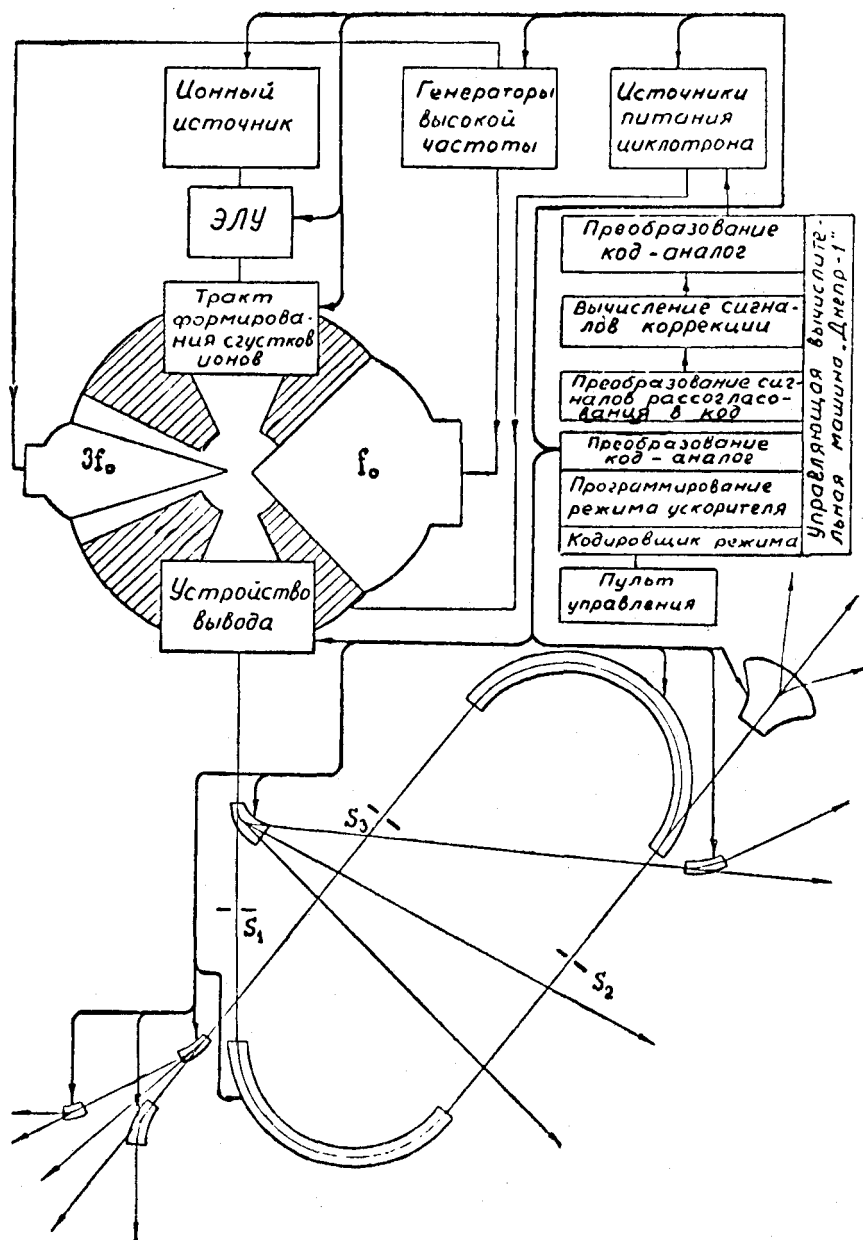


Рис. 5.