

В-269

Ат. Энергии, 1968, т. 24, в. 4, с. 317-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P9 - 3440 - 2

ЛАБОРАТОРИЯ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

**В.И. Векслер**, В.П. Саранцев, А.Г. Бонч-Осмоловский,  
Г.В. Долбилов, Г.А. Иванов, И.Н. Иванов,  
М.Я. Иовнович, И.В. Кожухов, А.Б. Кузнецов,  
В.Г. Маханьков, Э.А. Перельштейн, В.П. Рашевский,  
К.А. Решетникова, Н.Б. Рубин, С.Б. Рубин,  
П.И. Рыльцев, **О.И. Ярковой**

КОЛЛЕКТИВНОЕ ЛИНЕЙНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ

1967.

Доклад на IV Международной конференции  
по ускорителям США, Кембридж, 1967.

**Векслер В.И.**, Саранцев В.П., Бонч-Осмоловский А.Г., Р9-3440  
Долбиллов Г.В., Иванов Г.А., Иванов И.Н., Иовнович М.Я., Кожухов И.В.,  
Кузнецов А.Б., Маханьков В.Г., Перельштейн Э.А., Рашевский В.П.,  
Решетникова К.А., Рубин Н.Б., Рубин С.Б., Рыльцев П.И., **Ярковой О.И.**

### Коллективное линейное ускорение ионов

Проведено теоретическое рассмотрение и получено экспериментальное подтверждение возможности построения ускорителя, основанного на новом коллективном принципе ускорения, предложенном В.И. Векслером. Рассматриваются способы создания сгустка с большим числом частиц, его ускорения и поддержания постоянства его размеров. Из расчетов устойчивости сгустка выведены определенные условия на концентрацию частиц, а также на внешние электромагнитные поля, при которых возможно получение оптимальных размеров сгустка. Проведенные экспериментальные работы полностью согласуются с данными расчетов. Рассмотрение различных способов поддержания постоянства размеров сгустка дало возможность выбрать наиболее эффективный и экономически выгодный, который и реализуется на модели ускорителя. Основан выбор ускоряющей системы, для которой проведены расчеты эффективных электрических полей и показано, что они значительно превосходят получаемые в настоящее время в действующих ускорителях.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований,  
Дубна, 1987.**

**Veksler V.I., Sarantsev V.P., Bonch-Osmolovsky A.G.,** Р9-3440  
**Dolbilov G.V., Ivanov G.A., Ivanov I.N., Iovnovitch M.L.,**  
**Kozhukhov I.V., Kuznetsov A.B., Makhankov V.G.,**  
**Perel'stein E.A., Rashevsky V.P., Reshetnikova K.A., Rubin N.B.,**  
**Rubin S.B., Ryl'tsev P.I., Yarkovoy O.I.**

### Collective Linear Acceleration of Ions

A possibility of building an accelerator based on a new collective principle of acceleration (suggested by V.I. Veksler) is theoretically considered and proved by experiment. The methods of creation of a bunch with a large number of particles, its acceleration and supporting the stability of its size are considered. Certain conditions for the particle concentration as well as for the external electromagnetic fields, at which it is possible to obtain a bunch of an optimum size, are drawn from the calculations of the bunch stability. The experiments performed agree entirely with the calculation data. Consideration of different ways of supporting the bunch stability gives the possibility to choose the most effective and economically advantageous one, which is realized at the accelerator model. A choice of the accelerating system, for which the calculations of the effective electrical fields are made, is grounded. It is shown that these fields exceed considerably those obtained at present in the operating accelerators.

**Preprint, Joint Institute for Nuclear Research,  
Dubna, 1987.**

Р9 - 3440 - 2

53727, пр.  
В.И. Векслер, В.П. Саранцев, А.Г. Бонч-Осмоловский,  
Г.В. Долбилов, Г.А. Иванов, И.Н. Иванов,  
М.Я. Иовнович, И.В. Кожухов, А.Б. Кузнецов,  
В.Г. Маханьков, Э.А. Перельштейн, В.П. Рашевский,  
К.А. Решетникова, Н.Б. Рубин, С.Б. Рубин,  
П.И. Рыльцев, О.И. Ярковой

## КОЛЛЕКТИВНОЕ ЛИНЕЙНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ

Доклад на IV Международной конференции  
по ускорителям США, Кембридж, 1967.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## 1. В в е д е н и е

Быстрое развитие физики высоких энергий привело к ряду открытий большого значения. Однако наиболее фундаментальные закономерности мира элементарных частиц смогут быть, по-видимому, установлены и поняты только в том случае, когда будут созданы ускорители, дающие потоки частиц с энергией в сотни и тысячи миллиардов электронвольт. В настоящей работе показана возможность осуществления нового принципа ускорения заряженных частиц, который основан на использовании коллективного взаимодействия. Идея этого метода, высказанная несколько лет назад В.И. Векслером<sup>1/</sup>, состоит в том, чтобы для ускорения ионов использовать поля, возникающие при взаимодействии сгустка со струей электронов, потоком электромагнитного излучения или внутри двухкомпонентного сгустка. Для осуществления коллективного ускорения необходимо создание заряженного двухкомпонентного сгустка, состоящего из электронов,двигающихся во внешнем поле по замкнутым траекториям, и положительных ионов, захваченных внутрь электронного сгустка. Число ионов должно быть относительно невелико. Если плотность электронов в сгустке достаточно велика, то электрическое поле, удерживающее ионы на поверхности электронного сгустка, также может быть сделано очень большим. Благодаря этому создается возможность с помощью каких-либо электромагнитных полей ускорять электронный сгусток с захваченными внутрь его ионами как целое до очень высоких энергий.

Расчеты показывают, что уже в настоящее время вполне возможно экспериментально осуществить такие системы, в которых действующее на ионы ускоряющее поле будет достигать нескольких миллионов вольт на сантиметр, поэтому развиваемое новое направление позволяет рассчитывать на получение

протонов с энергией в сотни миллиардов электронвольт и выше относительно гораздо более простыми и экономичными средствами, чем это может быть осуществлено любым из известных способов. В настоящее время в Дубне сооружается модель такого ускорителя на энергию протонов в 1 Гэв.

## II. Получение заряженного кольцевого сгустка

Одной из основных задач при создании когерентного ускорителя является задача получения заряженного сгустка. Рассмотрение различных вариантов создания такого сгустка показало, что самый простой для осуществления способ — это получить сгусток в виде кольца, содержащего релятивистские электроны и покоящиеся ионы.

Инжекция электронов осуществляется в мягкофокусирующее поле, обычное для ускорителей, на орбиту большого радиуса. Далее из-за адиабатического роста магнитного поля происходит сжатие кольца до требуемых размеров. Такое сжатие, естественно, сопровождается набором энергии пучка. Амплитуды колебаний частиц около мгновенных орбит затухают, и конечное сечение кольца может быть получено достаточно малым. Ионы вводятся в кольцо в конечном состоянии путем впрыскивания определенной порции нейтрального газа. Нами были рассмотрены вопросы, касающиеся стационарного состояния электронного кольца и процесса его адиабатического сжатия. Учитывая, что интересующие нас интервалы времени значительно меньше длительности процесса максвеллизации в поперечном направлении, и плотности частиц сравнительно невелики, рассмотрение проводилось в приближении самосогласованного поля без учета интеграла столкновений.

В частности, в первом приближении, когда энергетический разброс в пучке равен нулю, движение пробной частицы в совокупном поле описывается уравнениями:

$$\frac{d}{dt} (\gamma_{\perp} \dot{\rho}) + \gamma_{\perp} \omega^2 [(1-n)(1-\mu P) - \mu \left( \frac{4R^2}{\gamma_{\perp}^2 \beta_{\perp} R^2 g(b+g)} \right) + \frac{P}{2}] \rho = 0$$

$$\frac{d}{dt} (\gamma_{\perp} \dot{Z}) + \gamma_{\perp} \omega^2 [n(1+\mu P) - \mu \left( \frac{4R^2}{\gamma_{\perp}^2 \beta_{\perp} R^2 b(b+g)} + \frac{P}{2} \right)] Z = 0,$$

где  $\rho = r - R$ ,  $\omega = \beta_{\perp} \frac{c}{R}$ ,  $\beta$  - скорость,  $\gamma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_{\perp}^2}}$ ,  $g$  и  $b$  - полуоси тора соответственно в направлениях  $r$  и  $Z$  (отнесенные к радиусу кольца)

$$\mu = \frac{\nu}{\gamma_{\perp}}, \quad \text{где} \quad \nu = \frac{e^2 N_0}{2 \pi R m_0 c^2}.$$

Адиабатическими инвариантами этих уравнений будут

$$\gamma_{\perp} R \beta_{\perp} \frac{a_{\rho}^2}{R} \sqrt{(1 - \mu)_{\text{эф}}} = J_{\rho}$$

$$\gamma_{\perp} R \beta_{\perp} \frac{a_z^2}{R^2} \sqrt{\mu_{\text{эф}}} = J_z,$$

где  $a_{\rho}$  и  $a_z$  - амплитуды колебаний в лаб. системе.

Легко показать, что если размеры кольца в процессе ускорения остаются неизменными в собственной системе, то эффективное поле, действующее на ионы в кольце, есть:

$$E_{\text{эф}} = \frac{2 e N_0}{\pi R^2 (g + b)}.$$

Используя адиабатические инварианты, можно получить при некоторых предположениях простую зависимость  $E_{\text{эф}}$  от начальных условий

$$E_{\text{эф}} \approx 30 H \sqrt{\gamma_{\perp 0}},$$

$H$  - конечное поле ( $H$  в эрстедах,  $E$  в/см).

Приведем численные оценки:

$$\gamma_{\perp 0} = 7, \quad H = 2 \cdot 10^4 \text{ эрст}, \quad E_{\text{эф}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ в/см},$$

конечный радиус 5 см. Тогда начальные размеры пучка получаются  $2q_0 R_0 = 8$  мм, полное число электронов  $N_0 = 0,8 \cdot 10^{13}$ . Увеличение вводимого числа частиц от инжектора дает возможность повысить  $E_{\text{эф}}$  в принципе до нескольких Мв/см. Рассмотренный пример соответствует состоянию, когда отсутствует энергетический разброс в пучке. При реализации состояния с энергетическим разбросом параметры пучка изменяются несущественно.

Задачей инжекции является создание кольца электронов с большим числом частиц и, как показывает приведенный пример, с довольно жесткими параметрами.

В качестве инжектора электронов нами используется линейный индукционный ускоритель, способный дать ток электронов в импульсе 200 а при напряжении до 3 Мв. Исследование нескольких вариантов инжекторов показало возможность применения железного экранирующего канала с токовой стенкой, компенсирующей искажение магнитного поля в области движения частиц.

Для обеспечения "промашки" пучка в момент инжекции создается резко нарастающее магнитное поле, так что шаг за оборот мгновенной орбиты превышает размеры пучка. Для модели этот прирост составляет примерно  $0,8 \cdot 10^8$  эрст/сек.

Из рассмотрения резонансных явлений при сжатии пучка была выбрана оптимальная зависимость показателя магнитного поля от радиуса, при которой можно избежать опасного прохождения резонансов. Такая зависимость была осуществлена специальным расположением обмоток постоянного и импульсного магнитного поля.

Рассмотренная нами модель предполагает создание интенсивного кольцевого пучка заряженных частиц с помощью слабой фокусировки. Известно, что в системах такого типа может развиваться продольная неустойчивость. Детальные расчеты этого явления с учетом влияния экрана показали, что при выбранных значениях начальных параметров пучка электронов, а также с учетом реального разброса частиц по энергиям такая неустойчивость не возникает. Была рассмотрена также устойчивость двухкомпонентного кольца по отношению к плазменным колебаниям. Анализ показал, что при инжекции ионов в конце сжатия размеры системы не допускают развития этого рода неустойчивостей. На основании проделанных расчетов была создана экспериментальная установка. Проведенные измерения на этой установке подтвердили правильность наших представлений и возможность создания сгустка с параметрами, близким к расчетным.

### III. Вывод кольца

По окончании процесса сжатия кольцо частиц оказывается зажатым между двумя магнитными пробками. Для вывода кольца создана система, обеспечивающая передвижение кольца как целого на расстояние 40 см, после чего кольцо попадает в ускоряюще-фокусирующую систему. Кроме передвижения кольца на систему вывода накладывается требование по удержанию ионов в кольце и



компенсированию кулоновского расталкивания электронов. Для выталкивания кольца из средней плоскости на расстояниях 18 и 20 см от нее располагаются два дополнительных витка, ток в которых начинает нарастать в конце процесса сжатия. При этом возникают силы, действующие на кольцо в Z направлении. Кольцо начинает двигаться, и скорость его движения определяется законом нарастания тока в витках. При линейном законе нарастания тока в дополнительных витках происходит деформация магнитной ямы, а именно, ее передвижение от средней плоскости с постепенным уменьшением глубины<sup>x)</sup>. Расположение катушек системы удерживающего поля на соответствующем расстоянии от средней плоскости позволяет обеспечить во всей области градиенты, не превышающие 10 эрст/см, что не противоречит условию удержания ионов в кольце. Конечная скорость кольца при выводе получается 0,2С.

#### IV . Ускорение кольца

При выборе способов осуществления дальнейших этапов ускорения приходится учитывать ряд условий и обстоятельств. Важнейшие из них: 1) одним из основных вопросов коллективного метода ускорения является динамика совместного ускорения тяжелых частиц-ионов и электронного сгустка. По смыслу этого метода в результате ускорения электронного сгустка ионы должны приобрести скорость, равную скорости электронов, тогда их энергия будет в  $\frac{M}{m_{\perp}}$  раз больше энергии электронов. Однако из простых физических соображений ясно, что совместное движение ионов и электронов вследствие различия их масс возможно не при произвольно больших внешних полях, ускоряющих сгусток как целое. Ионы ускоряются электрическим полем электронного сгустка до тех пор, пока они находятся внутри сгустка, но это условие может нарушаться при достаточно больших ускорениях сгустка вследствие влияния сил инерции, действующих на ионы.

Расчеты показывают, что это ограничение выражается:

$$E \leq \frac{m_{\perp}}{M} \frac{e N}{\pi a R},$$

где  $a$  - малый радиус кольца,  $M$  - масса иона,  $m_{\perp} = m \cdot \gamma_{\perp}$ .

<sup>x)</sup> Дальнейшее движение кольца происходит с ускорением в спадающем магнитном поле. Компенсация кулоновского расталкивания на последнем этапе вывода осуществляется дополнительной фокусирующей системой.



Так, для параметров сгустка, полученных для модели ускорителя, внешнее поле не должно превышать 20–10 кВ/см.

2) В отличие от обычных линейных ускорителей в нашем случае производится ускорение плотного одиночного сгустка электронов, суммарный заряд которого велик, так что собственный ток ускоряемых электронов сильно нагружает ускоряющую систему.

Учитывая эти обстоятельства, мы выбрали в качестве ускоряющего элемента однозакорный резонатор. Для такой системы ускорения были сделаны расчеты возможностей набора энергии сгустком. Так как в нашем случае через резонатор однократно пролетает сгусток (кольцо), несущий большой заряд и имеющий релятивистскую или почти релятивистскую скорость, то в такой системе существенным является запаздывание и поэтому обычный квазистатический расчет баланса энергий оказывается недостаточным. В системе могут произойти значительные потери энергии сгустком на излучение; за счет нагрузки током ускоряемых электронов может уменьшиться ускоряющее поле резонатора.

Проведенный электродинамический расчет модели цилиндрического резонатора показывает, что основные энергетические потери сгустка происходят за счет возбуждения ГМ-волн, причем наибольший вклад дают волны, соответствующие только радиальным гармоникам. Точный численный расчет набора энергии в резонаторе показал, что при достижимых в настоящее время напряженностях электрического поля в резонаторе вполне реально ускорение сгустка, несущего заряд  $10^{14}$  е, от значений  $\beta \approx 0,1$  до значений, как угодно близких к 1.

Однако использование цепочки резонаторов для ускорения сгустка из-за дискретности внешнего поля не позволяет получать максимально возможный прирост энергии сгустка по длине, поэтому нами в ускорителе принята комбинированная система, состоящая из последовательности резонаторов и изменяющегося особым образом магнитного поля. Для пояснения действия такой системы сделаем два вводных замечания:

1) При движении кольца частиц, имеющих азимутальную скорость в адиабатически спадающем от величин  $H_1$  до величин  $H_2$  поле, происходит увеличение продольной скорости кольца и уменьшение его азимутальной скорости. Эти изменения связаны с градиентом магнитного поля простым соотношением

В пространстве между резонаторами возможно применение для фокусировки волноводных систем. Как показали расчеты, можно сделать систему, в которой ускоряемое кольцо будет находиться в фазе с полем, при которой набор энергии будет равен нулю. Можно использовать для фокусировки замедленные  $E$ -волны или  $H$ -волны, создаваемые диафрагмированными или спиральными волноводами. Приведенная оценка фокусирующего действия показала, что для фокусировки кольца с параметрами, принятыми в модели ускорителя, достаточно амплитудного значения электрического поля - 40 кв/см.

В модели ускорителя, однако, нами применена для фокусировки пучка система, основанная на использовании сил изображения в анизотропной поверхности. При пролете заряженного сгустка вблизи экранирующей поверхности возникает электромагнитное поле. Детальный анализ этого поля показал, что при выборе определенных параметров экрана (диэлектрическая проницаемость, расстояние до кольца) можно обеспечить условия устойчивости в продольном направлении. При этом устойчивость по большому радиусу автоматически сохраняется. Эксперименты, проведенные на прямом пучке, показали правильность этих соображений и сделали возможной реализацию в ускорителе такой системы.

Таким образом, показана принципиальная возможность осуществления всех систем нового типа ускорителя. В настоящее время в Дубне сооружается модель такого ускорителя на энергию протонов порядка 1-го миллиарда электронвольт. Все основные узлы модели сооружены и настроены. На рис.1-4 показаны отдельные системы модели ускорителя: линейный индукционный ускоритель, камера для получения кольцевых сгустков и ускоряющая система. В настоящее время ведутся работы по выводу и ускорению кольцевого сгустка. По нашим планам наладка модели полностью закончится в начале 1968 года.

В заключение приведем таблицы основных параметров модели и ориентировочных параметров ускорителя на энергию 1000 Гэв.

	Энергия	Интенс. протонов/ цикл	Число циклов в сек.	Длина ускорителя	Число резонато- ров
Модель	1 Гэв	$10^{11}$	1	15 м	4
Проектируемый ускоритель	1000 Гэв	$10^{12}$	10-100	1500 м	3000

В разработке отдельных узлов проекта принимали участие О.А.Колпаков, В.Н.Мамонов, Ю.В.Муратов, Ю.Л.Обухов, Ю.И.Смирнов.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.И. Векслер. "Атомная энергия", № 5 (1957).
2. Г.И. Будкер. "Атомная энергия", № 5 (1958).
3. Bennett. Phys. Rev., 98, 1584 (1955).

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июля 1967 г.

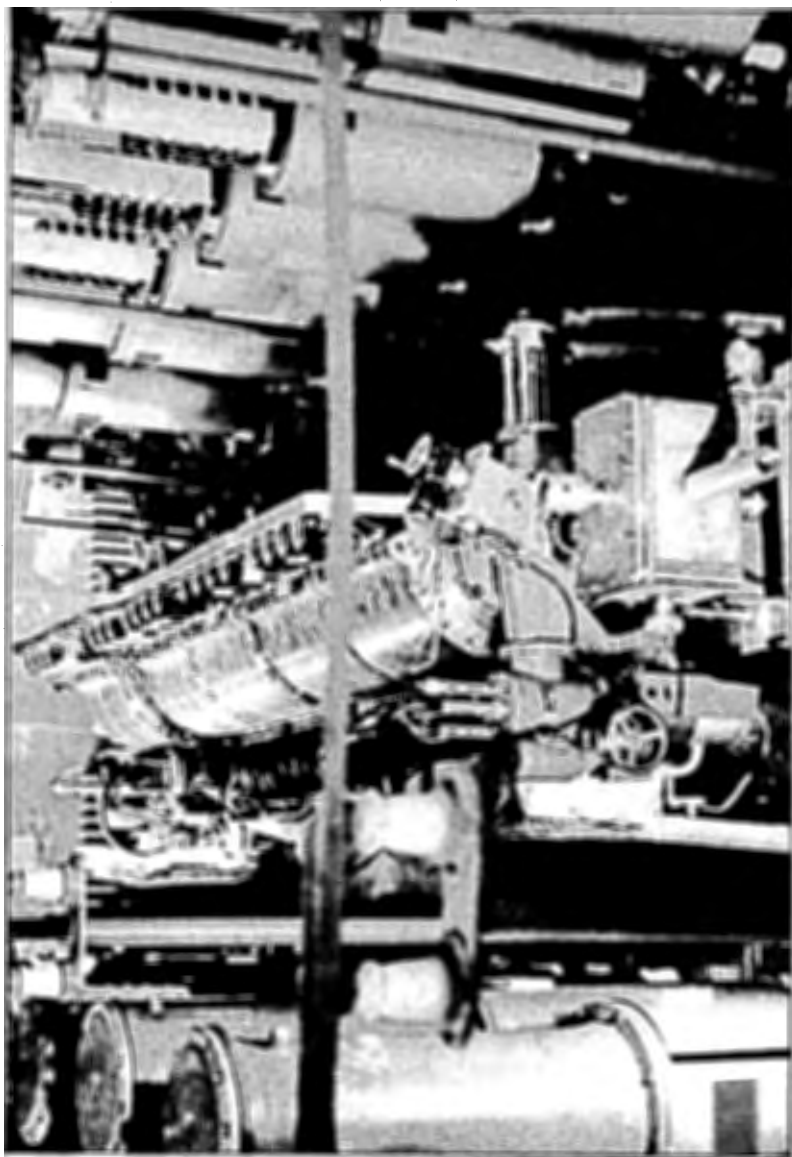


Рис. 1. Линейный индукционный ускоритель.

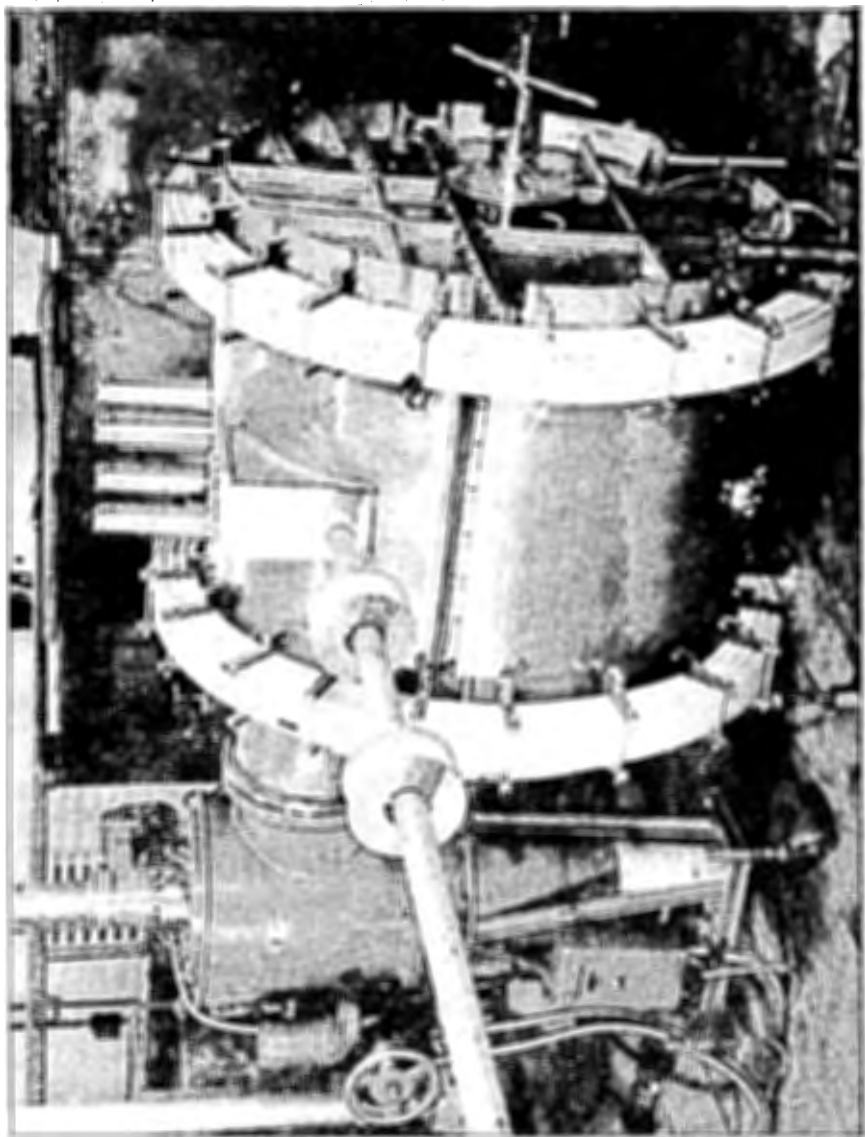


Рис. 2. Камера для получения кольцевых ступков.

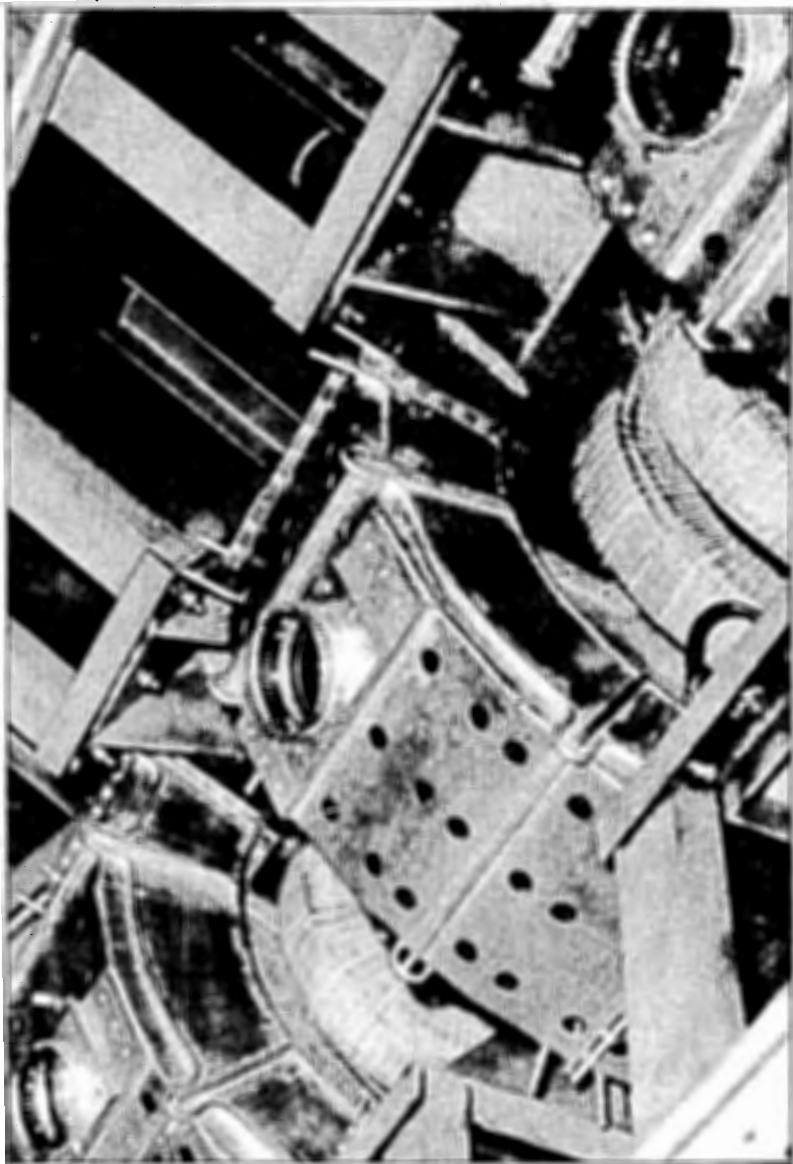


Рис. 3. Система ускоряющих резонаторов.

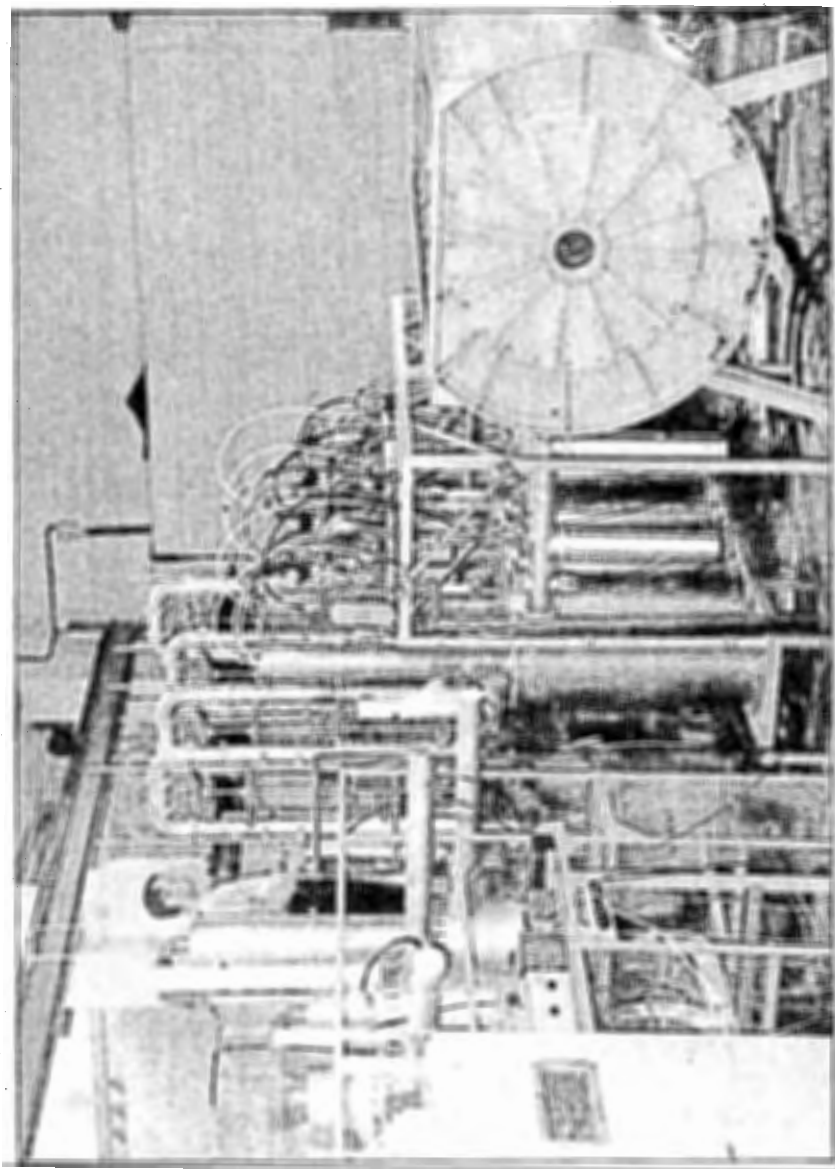


Рис. 4. Общий вид высокочастотной системы.