

Ж 53
А99

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

Атомная Энергия

Ежемесячный журнал
ГОД ИЗДАНИЯ ТРИНАДЦАТЫЙ

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Апрель ■ Вып. 4

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМИРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

- А. К. Красин, И. И. Саламатов, В. Б. Нестеренко, А. Н. Девойно. Развитие исследований в Институте ядерной энергетики АН БССР 307
- С. Т. Конобецкий, Б. М. Левитский, Л. Д. Пантелеев. К вопросу о механизме радиационного роста урана при малых дозах облучения 312
- В. И. Векслер, В. П. Саранцев, А. Г. Бонч-Осмоловский, Г. В. Долбильов, Г. А. Иванов, И. П. Иванов, М. Л. Ионович, 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 317
- В. П. Дзюбенко, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолотчиков, В. В. Кольга. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов 323
- В. В. Арсенин, В. А. Чуянов. О возможности подавления дрейфовой неустойчивости неоднородной плазмы с помощью системы обратных связей 327
- В. М. Вондаренко, Г. Г. Викторов, А. Г. Тархов. Об использовании космического излучения для оценки эффективности биологических защит 330
- С. Н. Барков. Многогрупповой аналитический метод расчета гетерогенного ядерного реактора 335
- П. Т. Потапенко. Предельная оценка качества внутриреакторного контроля нейтронного потока 340
- Д. М. Каминер, К. А. Коноплев, Ю. П. Семенов, В. Д. Тренин. Поведение продуктов радиолиза при работе реактора ВВР-М без системы дегазации 343
- В. А. Жарков, В. П. Терентьев, Г. М. Фрадкин. Получение топлива изотопных электрогенераторов методами нейтронного облучения 348
- Ю. В. Рябов, Со Дон Сик, Н. Чиков, Н. Янева. Измерение отношения сечений радиационного захвата и деления для U^{235} и Pu^{239} в резонансной области энергий нейтронов 351

- В. А. Афанасьев, Б. В. Кебадзе, Г. А. Санковский, В. И. Грицков, И. Н. Соколов, Л. А. Адамовский, С. А. Маркин. Экспериментальное исследование устойчивости корпусного кипящего реактора ВК-50 363

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

- Д. П. Осанов, В. П. Панова, Г. Б. Радзиевский. Измерение дозовых факторов накопления для точечных изотропных источников γ -излучения низкой энергии в воде 368
- В. А. Жарков, Т. П. Зорина, Г. М. Фрадкин. Самоэкранирование тепловых нейтронов в конечных цилиндрах и телах других геометрий 369
- И. Н. Бриккер, В. П. Астафьев, А. Р. Мирзаин. Обращенное решение тепловых уравнений двухкомпонентного ядерного реактора 370
- С. Ф. Дегтярев, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственные, угловые и энергетические распределения быстрых нейтронов в гидриде лития, воде, вольфраме и карбиде бора 370
- С. Ф. Дегтярев, В. Б. Староверов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Экспоненциальные угловые коэффициенты нейтронов для неводородосодержащих сред 372
- В. К. Даруга, С. Ф. Дегтярев, В. И. Кухтевич, А. Н. Николаев, В. П. Поливанский, Б. И. Синицын, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственно-энергетические и угловые распределения нейтронов в литии 372
- С. М. Рубанов, В. И. Титов, Л. С. Шкорбатова. Расчет защиты контура с циркулирующим горючим 373
- В. Д. Горяченко. Акустическая неустойчивость ядерного реактора 374
- В. Д. Горяченко, Е. Ф. Сабаев. Акустические колебания в реакторе с циркулирующим газообразным горючим 375
- В. Д. Горяченко, В. А. Денеев, Ю. Ф. Трунин. Влияние изменения плотности делящегося вещества на устойчивость реактора с циркулирующим веществом 376
- В. С. Шуленни. Применение асимптотического P_N -приближения для расчета ячейки 376

285607

225307/1/10



РГ

Коллективное линейное ускорение ионов

В. И. ВЕКСЛЕР, В. П. САРАНЦЕВ, А. Г. БОНЧ-ОСМОЛОВСКИЙ, Г. В. ДОЛБИЛОВ, Г. А. ИВАНОВ,
И. Н. ИВАНОВ, М. Л. ЮВНОВИЧ, 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

УДК 621.384.6

Введение

Быстрое развитие физики высоких энергий привело к открытиям большого значения. Однако наиболее фундаментальные закономерности мира элементарных частиц могут 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 ранее В. И. Векслером [1], заключается в использовании для ускорения ионов полей, возникающих при взаимодействии сгустка со струей электронов, с потоком электромагнитного излучения или внутри двухкомпонентного сгустка. Для осуществления коллективного ускорения необходимо создание заряженного двухкомпонентного сгустка, который состоит из электронов, двигающихся во внешнем поле по замкнутым траекториям, и положительных ионов, захваченных внутри 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 достигать очень больших значений. Благодаря этому появляется возможность с помощью каких-либо электромагнитных полей ускорять электронный сгусток с захваченными внутри него 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. Это позволяет рассчитывать на получение протонов с энергией в сотни миллиардов электронвольт и выше гораздо более простыми и экономными средствами, чем это может быть осуществлено любым из известных способов. В настоящее время в Дубне сооружается модель такого ускорителя на энергию протонов 1 Гэв. Общая схема ускорителя приведена на рис. 1.

Получение заряженного кольцевого сгустка

Одна из основных задач, стоящих перед создателями когерентного ускорителя, — получение заряженного сгустка. Рассмотрение различных вариантов создания такого сгустка показало, что самый простой способ — это получить сгусток в виде кольца, содержащего релятивистские электроны и покоящиеся ионы.

Электроны инжектируются в мягко фокусирующее поле, обычное для ускорителей, на орбиту

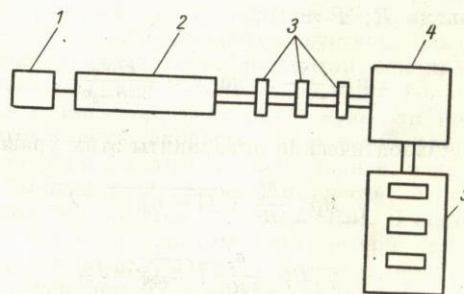


Рис. 1. Общая схема ускорителя.

1 — электронная пушка; 2 — линейный индукционный ускоритель; 3 — линзы; 4 — камера для получения сгустка; 5 — ускоряющие резонаторы.

большого радиуса. Затем из-за адиабатического роста магнитного поля кольцо сжимается до требуемых размеров. Такое сжатие, естественно, сопровождается увеличением энергии пучка. Амплитуды колебаний частиц около мгновенных орбит затухают, и конечное сечение кольца может оказаться достаточно малым. Ионы вводятся в кольцо в конце процесса сжатия путем впрыскивания определенной порции нейтрального газа.

Нами были рассмотрены вопросы, касающиеся стационарного состояния электронного кольца и процесса его адиабатического сжатия. Ввиду того, 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:

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

где $\rho = r - R$; $\omega = \beta_{\perp} \frac{c}{R}$; β — 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 R ; $P \approx 10$;

$$\mu = \frac{v}{\gamma_{\perp}}, \text{ где } v = \frac{e^2 N_e}{2\pi R m_e c^2}.$$

Адиабатические инварианты этих уравнений:

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

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

где a_{ρ} и a_z — амплитуды колебаний в лабораторной системе координат. Легко показать, что если размеры кольца в процессе ускорения остаются неизменными в собственной системе, то эффективное поле, действующее на ионы в кольце, есть

$$E_{\text{эфф}} = \frac{2eN_e}{\pi R^2 (g+b)}.$$

Используя адиабатические инварианты, можно получить при некоторых предположениях простую зависимость $E_{\text{эфф}}$ (в/см) от начальных условий

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

где H (э) — конечное поле.

Приведем численные оценки: $\gamma_{\perp 0} = 7$, $H = 2 \cdot 10^4$ э, $E_{\text{эфф}} = 1,5 \cdot 10^6$ в/см, конечный радиус 5 см. Тогда начальные размеры пучка $2g_0 R_0 = 8$ мм, полное число электронов $N_e = 0,8 \cdot 10^{13}$. Увеличение вводимого числа частиц из инжектора дает возможность повысить $E_{\text{эфф}}$ в принципе до нескольких Мв/см.

Рассмотренный пример соответствует состоянию, когда нет энергетического разброса 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 $0,8 \cdot 10^6$ э/сек.

В результате анализа 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.

В описанной модели предполагается 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 при учете 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 таких неустойчивостей. На основании проведенных расчетов была создана экспериментальная установка. Измерения, проведенные на ней, подтвердили правильность наших представлений и возможность создания сгустка с параметрами, близким к расчетным.

Вывод кольца

По окончании процесса сжатия кольцо частиц оказывается зажатым между двумя маг-

нитными пробками. Для вывода кольца была создана система, обеспечивающая передвижение его как целого на расстояние 40 см, после чего кольцо попадает в ускоряюще-фокусирующую систему. Кроме передвижения кольца к системе вывода предъявляются требования по удержанию ионов в кольце и компенсированию кулоновского расталкивания электронов. Для выталкивания кольца из средней плоскости установки на расстояниях 18 и 20 см от нее располагается два дополнительных витка, ток в которых начинает нарастать в конце процесса сжатия. При этом возникают силы, действующие на кольцо в направлении z , и оно начинает двигаться. 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 ее глубины*. Расположение катушек системы удерживающего поля на соответствующем расстоянии от средней плоскости позволяет обеспечить во всей области градиенты, не превышающие 10 э/см, что не противоречит условию удержания ионов в кольце. Конечная скорость кольца при выводе составляет 0,2 с.

Ускорение кольца

При выборе способов осуществления дальнейших этапов ускорения приходится учитывать ряд условий и обстоятельств. Важнейшими из них являются следующие.

1. Один из основных вопросов коллективного метода ускорения — динамика совместного ускорения тяжелых частиц — ионов и электронного сгустка. По этому методу в результате ускорения электронного сгустка ионы должны приобрести скорость, равную скорости электронов, тогда их энергия будет в 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

* Дальнейшее движение кольца происходит с ускорением в спадающем магнитном поле. Компенсация кулоновского расталкивания на последнем этапе вывода осуществляется дополнительной фокусирующей системой.

из-за влияния сил инерции, действующих на ионы.

Расчеты показывают, что это ограничение выражается формулой

$$E \ll \frac{m_{\perp}}{M} \cdot \frac{eNe}{\pi aR},$$

где a — малый радиус кольца; M — масса иона; $m_{\perp} = m_e \gamma_{\perp}$. Так, для параметров сгустка, полученных для модели ускорителя, внешнее поле не должно превышать 20–40 кэ/см.

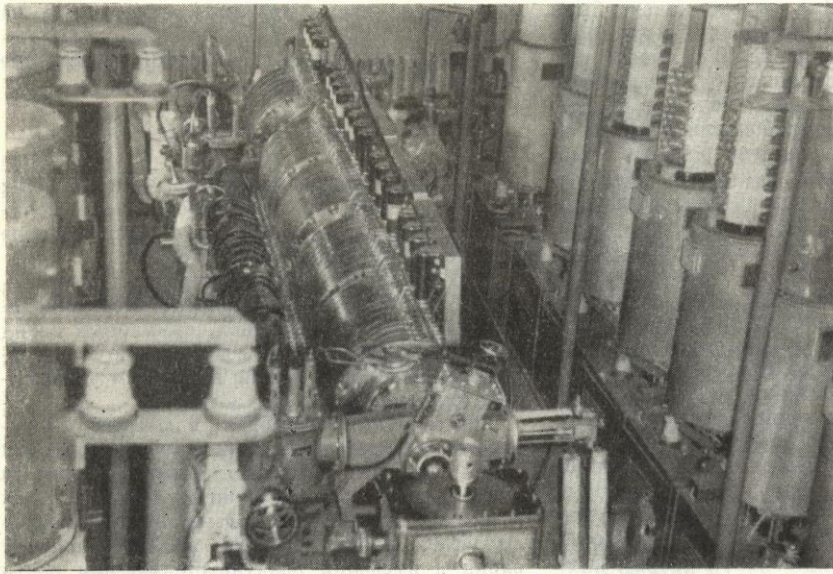
2. В отличие от обычных линейных ускорителей в нашем случае ускоряется плотный одиночный сгусток электронов, суммарный заряд которого велик, так что собственный ток ускоряемых электронов сильно нагружает ускоряющую систему.

Учитывая это, мы выбрали в качестве ускоряющего элемента однозворный резонатор. Для такой системы ускорения были рассчитаны возможности 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; вследствие нагрузки током ускоряемых электронов может уменьшиться ускоряющее поле резонатора.

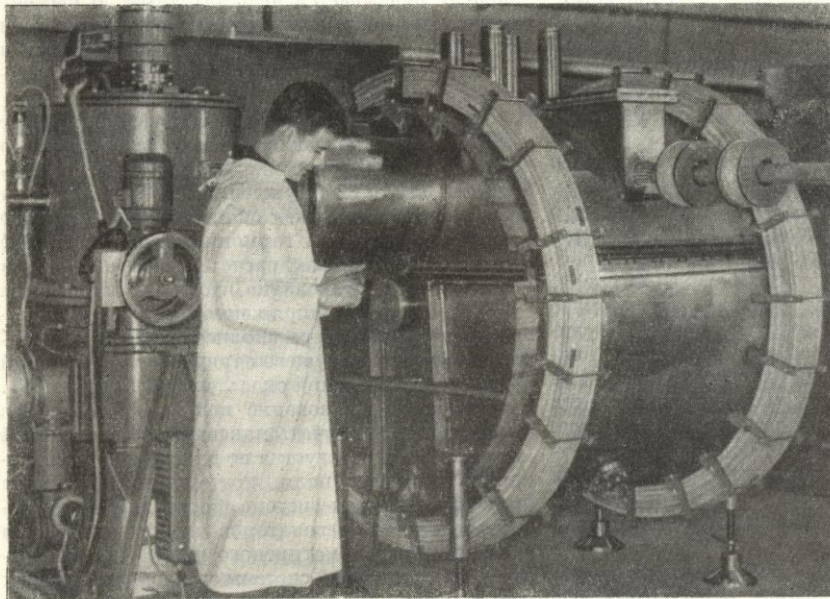
Проведенный электродинамический расчет модели цилиндрического резонатора показал, что основные энергетические потери сгустка происходят за счет возбуждения TM -волн, причем наибольший вклад дают волны, соответствующие только радиальным гармоникам. В результате точного численного расчета набора энергии в резонаторе установлено, что при достижимых в настоящее время напряженностях электрического поля в резонаторе вполне осуществимо ускорение сгустка, несущего заряд $10^{14}e$ от значений $\beta \approx 0,1$ до значений сколь угодно близких к 1.

Однако использование цепочки резонаторов не позволяет получать максимально возможный прирост энергии сгустка по длине из-за дискретности внешнего поля, поэтому нами 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 сла-



Р и с. 2. Линейный индукционный ускоритель.



Р и с. 3. Камера для получения кольцевых сгустков.

~~225307~~

235607

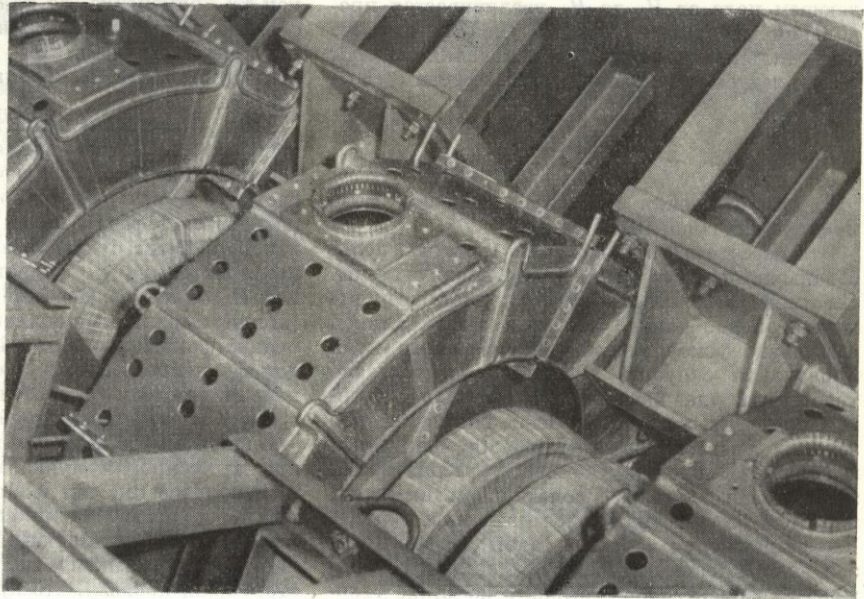


Рис. 4. Система ускоряющих резонаторов.

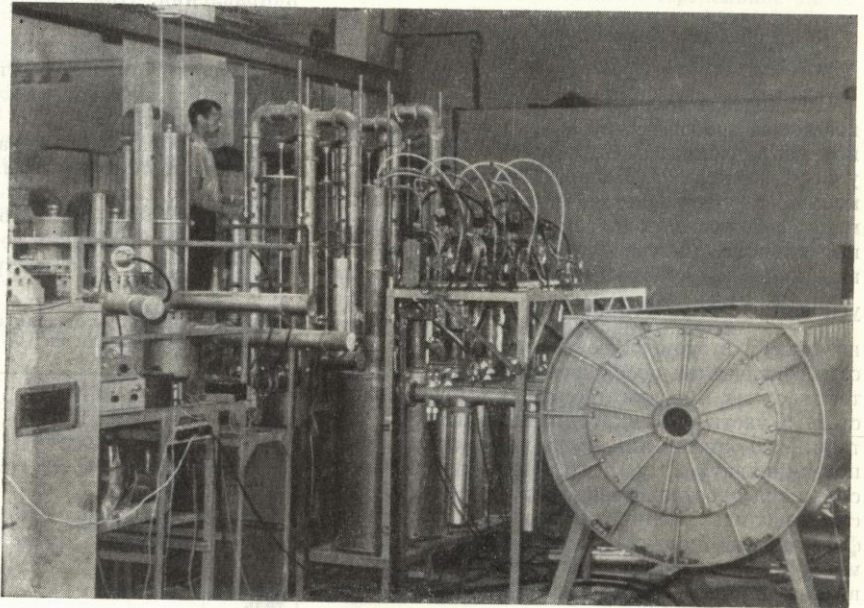


Рис. 5. Общий вид высокочастотной системы.



дающем поле от H_1 до H_2 увеличивается продольная скорость кольца и уменьшается его азимутальная скорость. Эти изменения связаны с градиентом магнитного поля простым соотношением

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \approx \sqrt{\frac{H_1}{H_2}};$$

2) при движении кольца в растущем поле происходит обратный процесс.

Эти известные обстоятельства и были использованы нами для создания ускоряющей системы. На длине резонатора создается растущее магнитное поле, такое, что при максимальной амплитуде ускоряющего электрического поля продольная скорость увеличивается согласно требованию удержания ионов. Остальная энергия электрического поля идет на увеличение энергии вращательного движения электронов в кольце. В промежутке между резонаторами энергия, запасенная во вращательном движении, переходит в поступательное движение кольца. Расчет движения частиц в такой системе показал возможность получения заданного ускоряющего градиента, непрерывного по длине ускорителя. При этом магнитное поле в среднем остается постоянным и таким, как это требуется для удержания кольцевого сгустка.

Фокусировка заряженного кольца при ускорении

При выводе кольца из потенциальной ямы возникает проблема его фокусировки в продольном направлении. Эта проблема остается и при ускорении кольца. Поперечный малый радиус кольца поддерживается неизменным одновременно с большим радиусом благодаря действию продольного магнитного поля. В принципе внешняя фокусировка не нужна при выполнении условия самофокусировки $(N_i = \frac{N_e}{\gamma_1^2})$ [2, 3], но даже и в этом случае, как следует из простых физических соображений, необходима потенциальная яма для ликвидации неустойчивостей, в частности гидродинамических. Мы считаем, что внешними полями нужно создать потенциальную яму, достаточную для компенсации сил пространственного заряда. Нами рассматривались различные способы продольной фокусировки кольца в движении. Часть этих методов, таких, как фокусировка излучением в замедляющих структурах, фокусировка градиентом магнитного поля и винтовыми магнитными полями, здесь не будет обсуждаться, так

как их применение, по крайней мере в модели, связано либо с техническими, либо с принципиальными трудностями, например интенсивным торможением кольца в фокусирующей системе.

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

Однако в модели ускорителя 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, подтвердили правильность этих соображений и сделали возможным реализацию такой системы в ускорителе.

Таким образом, показана принципиальная возможность осуществления всех систем ускорителя нового типа. В настоящее время в Дубне сооружается модель такого ускорителя на энергию протонов порядка 1 ГэВ . Все основные узлы модели сооружены и настроены.

Основные параметры модели и ориентировочные параметры ускорителя на 1000 ГэВ

	Энергия, ГэВ	Интенсивность, протонов/цикл	Число циклов в 1 сек	Длина ускорителя, м	Число резонаторов
Модель	1	10^{11}	1	15	4
Проектируемый ускоритель	1000	10^{12}	10—100	1500	3000

На рис. 2—5 показаны отдельные системы модели ускорителя: линейный индукционный ускоритель, камера для получения кольцевых сгустков и ускоряющая ВЧ-система. В настоящее время ведутся работы по выводу и ускорению кольцевого сгустка. По нашим планам наладка и запуск модели закончатся в 1968 г.

Выше приведена таблица основных параметров модели и ориентировочных параметров ускорителя на энергию 1000 Гэв. Отметим, что в разработке отдельных узлов проекта прини-

мали участие О. А. Колпаков, В. Н. Мамонов, Ю. В. Муратов, Ю. Л. Обухов, Ю. И. Смирнов и др.

Поступила в Редакцию 12/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер. «Атомная энергия», 2, 42 (1957).
2. Г. И. Будкер. «Атомная энергия», 1, № 5 (1956).
3. W. Bennett. Phys. Rev., 98, 1584 (1955).

Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов*

В. П. ДЖЕЛЕПОВ, В. П. ДМИТРИЕВСКИЙ, Б. И. ЗАМОЛОДЧИКОВ, В. В. КОЛЬГА

УДК 621.384.612.4

Успехи в получении новых трансурановых элементов [1], возможности, которые предсказываются теоретическими исследованиями устойчивости сверхтяжелых элементов [2], а также перспективы использования ускоренных многозарядных ионов в медицине и биологии поставили перед техникой ускорения заряженных частиц новые задачи.

Выбор оптимального типа ускорителя для ускорения многозарядных ионов — одна из таких задач. Если определена требуемая кинетическая энергия частиц в ускорителе на один нуклон, при решении этого вопроса в основном исходят из экономических соображений, а также перспектив дальнейшего развития каждого типа ускорителя.

Существенной особенностью ускорителей многозарядных ионов по сравнению с протонными или дейтонными ускорителями является наличие эффекта изменения заряда при взаимодействии с молекулами остаточного газа вакуумной камеры. Если основываться на известных сечениях этого процесса [3], то связь между давлением в вакуумной камере и временем ускорения будет определяться неравенством

$$p\tau \leq 10^{-10},$$

где p дано в торрах; τ — в секундах.

Таким образом, при эксплуатационных уровнях разрежения в вакуумных камерах современных ускорителей ($0,5-1 \cdot 10^{-6}$ торр) время ускорения не должно превышать 100—

200 мксек, что соответствует циклотронному способу ускорения.

Вторая особенность ускорителей многозарядных ионов — более жесткое ограничение, накладываемое пространственным зарядом пучка, что связано с большим зарядом каждой частицы и далекими от релятивизма скоростями (при энергиях 6—10 Мэв/нуклон). Предельное число ионов в секунду, определяемое эффектом пространственного заряда, для циклотронов пропорционально частоте собственных колебаний и обратно пропорционально массе иона ($i \sim \sim \frac{Q\Delta Q}{A}$); магнитную систему для таких ускорителей следует выбирать с максимальной жесткостью, так как при ускорении ионов с $A \gg \gg 200$ этот эффект становится определяющим.

Приведенные соображения побудили авторов рассмотреть возможность использования кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой для ускорения многозарядных ионов.

Ускоритель состоит из кольцевой магнитной системы, которая обеспечивает жесткую фокусировку по двум ортогональным осям ($Q_r, z > > 1$) и изохронность замкнутых орбит; системы ускорения, представляющие собой резонансные полости, работающие на постоянной частоте, и инжектора частиц типа Ван де Граафа или Кокрофта — Уолтона.

К настоящему времени проведено сравнительно немного исследований, посвященных ускорению многозарядных ионов с массой $A > 40$ на ускорителях прямого действия [3]. Однако эти исследования показывают, что можно полу-

* Статья печатается в порядке обсуждения.