

С 345
С. 794

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 3861

В.Л.Степанюк

СИСТЕМА КРАТНОГО УСКОРЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ОИЯИ

Специальность № 280.

Электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Дубна 1968

9 - 3861

В.Л.Степанюк

СИСТЕМА КРАТНОГО УСКОРЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ОИЯИ

Специальность № 280.

Электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук И.Н.Семенюшкин

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Ф.А.Водошнянов

кандидат физико-математических наук А.А.Глазов

Предприятие-рецензент Институт физики высоких энергий

Автореферат разослан " " 1968 г.

Защита диссертации состоится " " 1968 года
на заседании Учёного Совета ЛВЭ ОИЯИ, в конференц-зале Лаборатории высоких энергий, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Учёный секретарь Совета

А.А.Кузнецов

5385 бр

Изучение процессов, инициируемых такими редкими частицами, как антипротоны и K -мезоны высоких энергий, занимает важное место в современной ядерной физике. Однако эффективность изучения во многом определяется возможностью сепарации этих частиц от сопутствующего им π -мезонного фона.

В 1957 г. В.И.Векслер и В.А.Петухов предложили электродинамический метод сепарации частиц высоких энергий по массам. В настоящее время в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ завершены наладка и испытание созданного на основе этого метода сепаратора частиц высоких энергий и получен сепарированный пучок антипротонов с импульсом 5 Гэв/с. В диссертации изложены основные результаты, полученные в процессе разработки, наладки и испытания одной из основных частей сепаратора - системы кратного ускорения протонов в синхрофазотроне на 10 Гэв.

В 1-ой главе диссертации описан принцип работы электродинамического сепаратора, проведены теоретическое рассмотрение режима кратного ускорения протонов высоких энергий в синхрофазотроне и расчёт основных характеристик системы кратного ускорения (СКУ), а также дано обоснование выбора блок-схемы СКУ. Электродинамический сепаратор частиц высоких энергий ОИЯИ работает следующим образом. За 0,3 + 0,7 сек до конца цикла основного ускорения происходит переключение синхрофазотрона в режим ускорения на постоянной

частоте $f_{1q} = 1497,7$ кгц. При достижении протонами максимальной энергии $W = 10$ Гэв напряжение с частотой f_{1q} снимается и одновременно включается система кратного ускорения, частота которой $f_p = 149,520$ Мгц. Происходит перезахват и последующее кратковременное (в течение 20 мсек) ускорение протонов на высокой кратности $q = 104$, в результате чего пучок протонов приобретает высокочастотную структуру. Далее с помощью системы создания азимутальной асимметрии магнитного поля синхрофазотрона перезахваченный пучок относительно медленно (в течение 2+3 мсек) наплывает на внешнюю мишень. При этом на выходе из мишени возникает периодическая последовательность коротких сгустков вторичных частиц со скважностью $Q \geq 5$, периодом следования $t_s \approx 2$ м и фоном между сгустками не более 0,1% от количества частиц в сгустках. Далее пучок вторичных частиц фокусируется, проходит через два поворотных магнита и коллиматор, в результате чего выделяются отрицательно заряженные частицы с импульсом $5 \pm 0,0025$ Гэв/с. После этого пучок частиц попадает в высокочастотное отклоняющее устройство. Расстояние от мишени до центра отклоняющего устройства $L = 58$ м выбрано таким, чтобы после прохождения его антипротоны отстали от π^- -мезонов ровно на полпериода $t_s/2$. Резонаторы отклоняющего устройства сфазированы таким образом, чтобы сгустки антипротонов отклонялись влево, а сгустки π^- -мезонов - вправо.

На основе измеренного распределения перезахватываемых протонов по энергиям было выбрано аналитическое выражение функции распределения, с помощью которого методом численного интегрирования получены зависимости коэффициента перезахвата протонов в режим кратного ускорения σ от напряжения на щели резонатора U_p , энергии перезахватываемых протонов W , энергетического разброса ΔW_m , кратности ускорения q и отклонения ΔW_0 центра сепаратрисы q -ой кратности относительно равновесной энергии. На рис. 1 приведены две расчётные зависимости σ от U_p , соответствующие рабо-

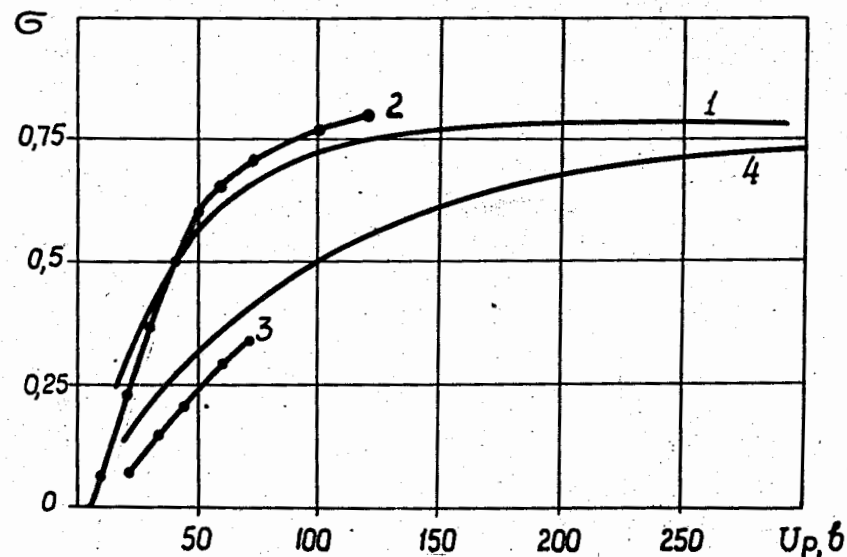


Рис. 1. Зависимость коэффициента перезахвата протонов в режим кратного ускорения от напряжения на щели резонатора U_p при энергии протонов $W = 10$ Гэв, кратности ускорения $q = 104$ и частоте кратного ускорения $f_p = 149,520$ Мгц. 1. Расчётная кривая, $\Delta W_m = \pm 1,7$ Мэв, 2. Экспериментальная кривая, $\Delta W_m = \pm 1,7$ Мэв, 3. Экспериментальная кривая $\Delta W_m = \pm 2,8$ Мэв, 4. Расчётная кривая $\Delta W_m = \pm 2,8$ Мэв.

чему режиму СКУ, то есть энергии протонов $W = 10$ Гэв, кратности $q = 104$, энергетическому разбросу $\Delta W_m = \pm 1,7$ Мэв (кривая 1) и $\Delta W_m = \pm 2,6$ Мэв (кривая 4). На основе этих данных произведен выбор необходимого напряжения на щели резонатора СКУ. Как видно по кривой 1, достаточно высокий коэффициент перезахвата $\sigma \approx 0,7$ имеет место при $U_p \approx 100$ кВ. С учётом расчётной зависимости коэффициента перезахвата σ от отклонения центра сепаратрисы q -ой кратности относительно равновесной энергии были определены максимально допустимые отклонения частот f_p и f_{1q} от кратного соотношения, составившие соответственно $\frac{\Delta f_p}{f_p} < 3 \cdot 10^{-5}$ и $\frac{\Delta f_{1q}}{f_{1q}} < 3 \cdot 10^{-5}$. Выбор рабочей частоты СКУ $f_p = 150$ Мгц в основном определился из расчёта электродинамического сепаратора в целом на основе имеющейся базы пролета L . Это значение f_p оказалось не совсем подходящим с точки зрения условий работы резонатора СКУ. Рабочий тип волны, возбуждаемый резонатором в камере синхрофазотрона - E_{II} , а критическая длина волны камеры для этого типа волны $\lambda_{kp} \approx 0,8$ м. Однако не

исключена возможность частичной трансформации волны E_{11} на неоднородностях, имеющих в камере, в волну H_{01} . Поскольку критическая длина волны камеры для волны H_{01} составляет $\lambda_{кр} = 3,2$ м, появляется возможность излучения высокочастотной мощности из резонатора в камеру, т.к. рабочая длина волны λ_p при этом становится меньше критической. В диссертации приводятся обоснования выбора длительности импульса СКУ $t_a = 20$ мсек, спада вершины $\frac{\Delta U_p}{U_p} < 10\%$, частоты посылок $F = 1/9$ гц.

Блок-схема, выбранная из условия получения вышеприведенных параметров, представлена на рис. 2. Запускается СКУ при помощи импульса, соответствующего моменту времени, когда

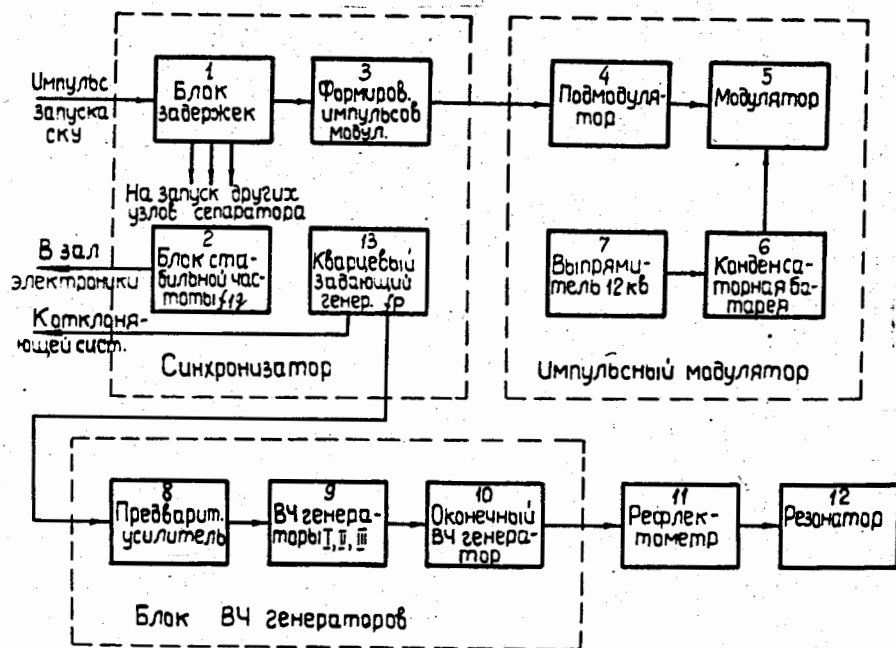


Рис. 2. Блок-схема системы кратного ускорения.

энергия протонов достигла $W = 10$ Гэв. Этот импульс поступает из зала электроники синхрофазотрона на вход блока задержек 1. С выхода этого блока импульсы с необходимыми задержками поступают на запуск формирователя импульсов моделиатора 3, а также высокочастотной отклоняющей системы, физической аппаратуры и других узлов сепаратора. Импульсный модулятор 4, 5, 6, 7 формирует высоковольтные импульсы, поступающие на аноды генераторных ламп. Блок ВЧ генераторов 8, 9, 10 состоит из 7-ми каскадов. Оконечный каскад 10 осуществляет питание резонатора 12. Рефлектометр 11 контролирует согласование резонатора с вводным фидером и уровень мощности, поступающей в резонатор. Генератор стабильной частоты 2 генерирует напряжение с частотой f_{1q} , которое поступает в зал электроники, где используется для синхронизации высокочастотных ускоряющих систем синхрофазотрона (после его перестройки в режим ускорения на постоянной частоте). Кварцевый задающий генератор 13 вырабатывает напряжение с частотой f_p , поступающее на вход блоков ВЧ генераторов СКУ и отклоняющей системы.

2-ая глава диссертации посвящена резонатору СКУ. Конструкция резонатора была выбрана такой, чтобы он вписывался в вводный прямолинейный промежуток вакуумной камеры синхрофазотрона и не создавал помех процессу основного ускорения. Резонатор СКУ представляет собой четвертьволновой отрезок коаксиальной линии с прямоугольным поперечным сечением и продольным отверстием внутри центрального проводника для прохождения пучка протонов (см. рис. 3). Приводится методика расчёта добротности и волнового сопротивления резонатора. Для того чтобы исключить возможность трансформации волны E_{11} в H_{01} , а, следовательно, излучения ВЧ мощности в камеру синхрофазотрона, в резонаторе предусмотрены два прямоугольных экрана 3 (рис. 3), которые предотвращают проникновение волны E_{11} в камеру, где имеется много практически неустраняемых неоднородностей. Трансформация E_{11} в H_{01} внутри

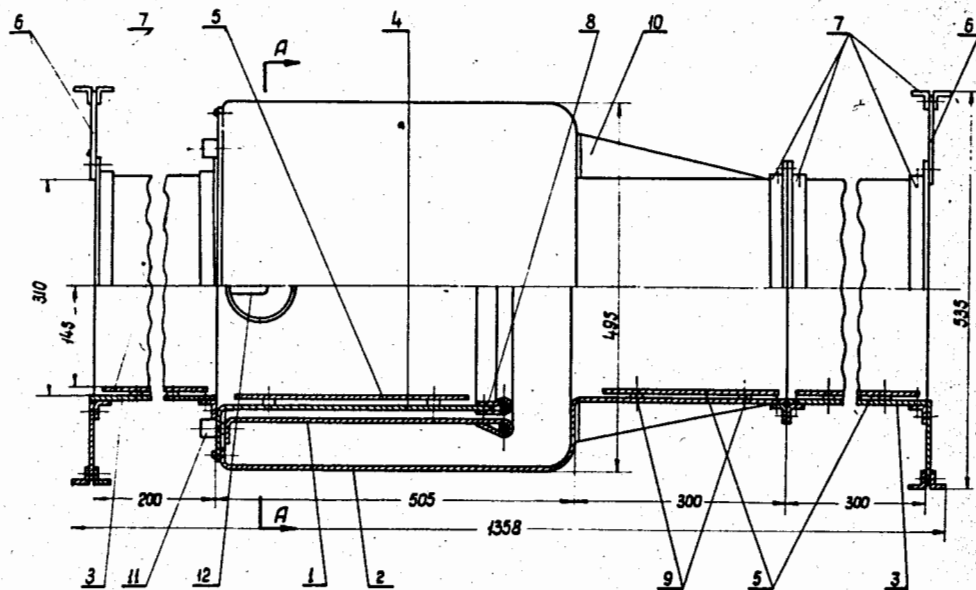


Рис. 3. Общий вид резонатора СКУ. 1. Электрод. 2. Наружный проводник. 3. Экраны для подавления излучения. 4. Центральный проводник. 5. Система плоских электродов. 6. Контактные пластины. 7. Уголки. 8. Подвижная рамка для настройки на частоту. 9. Изоляторы плоских электродов. 10. Ребра жесткости. 11. Изоляторы электрода. 12. Петля связи.

резонатора и его экранов предотвращается путем специальной механической юстировки резонатора совместно с экранами. Приводится метод расчёта экранов. На основе измеренного методом малых возмущений распределения ВЧ электрического поля в районе щели резонатора приводится результат графического расчёта фактора времени пролета $T = 0,91$ для $W = 10$ Гэв.

Главное внимание во 2 главе уделяется вопросам подавления резонансного высокочастотного разряда (РВР, мультипакция), поскольку резонатор СКУ должен работать в вакууме. Дополнительными обстоятельствами, способствовавшими возникновению разрядных явлений в резонаторе, явились наличие в районе расположения резонатора довольно сильного рассеянного магнитного поля магнита синхрофазотрона $H_z \approx 50$ э, а также

"сверхдлинный" импульсный режим работы резонатора. Приводимые в литературе исследования РВР, как правило, не доведены до формы, пригодной для конкретных инженерных расчётов. Очень мало чётких рекомендаций по выбору метода подавления РВР в каждом конкретном случае. Недостаточно исследовано влияние магнитного поля на РВР. Отсутствуют инженерные рекомендации по применению метода подавления РВР с помощью напряжения смещения. Поскольку в процессе разработки и испытания резонатора СКУ пришлось столкнуться со многими из вышеперечисленных проблем, нами были предприняты попытки решения некоторых из них. При расчёте верхней и нижней границ напряжений РВР в зависимости от параметра fd (f — частота, d — расстояние между электродами) учёт начальных скоростей вторичных электронов производился методом, несколько отличным от общепринятого. Обычно полагают, что начальные скорости вторичных электронов пропорциональны скоростям первичных. Такое предположение позволяет получить простые аналитические выражения для напряжений РВР. Однако такое предположение противоречит физике вторичной эмиссии. В действительности в широком интервале энергий падающих электронов функция распределения вторичных электронов по скоростям остается практически неизменной. Поэтому в диссертации начальные скорости синхронных электронов выбраны в районе максимума функции распределения ($v_H = 1,5 \cdot 10^8$ см/сек). Электроны с другими начальными скоростями, очевидно, будут совершать затухающие фазовые колебания относительно синхронной фазы (то есть фазы, соответствующей точному резонансу). В диссертации приводятся результаты расчёта границ напряжений РВР в диапазоне $fd = 100 + 10000$ Мгц · см.

Для оценки влияния РВР на характеристики резонатора необходимо иметь данные о предельной плотности тока РВР. Предельная плотность тока ограничивается максимальной плотностью заряда сгустков электронов, участвующих в РВР, при

которой электроны, вылетевшие из данного электрода, еще не будут возвращаться отрицательным потенциалом сгустков к исходному электроду. На основе этого предположения проведен расчёт предельной плотности тока, удельной мощности и удельного сопротивления РВР, соответствующих максимальному значению разрядного напряжения U_n , в диапазоне $fd = 100 + 10000$ Мгц.см. Как видно из рис. 4, удельная мощность, поглощаемая РВР, имеет минимальное значение при $fd = 100$ Мгц.см и с ростом fd растет.

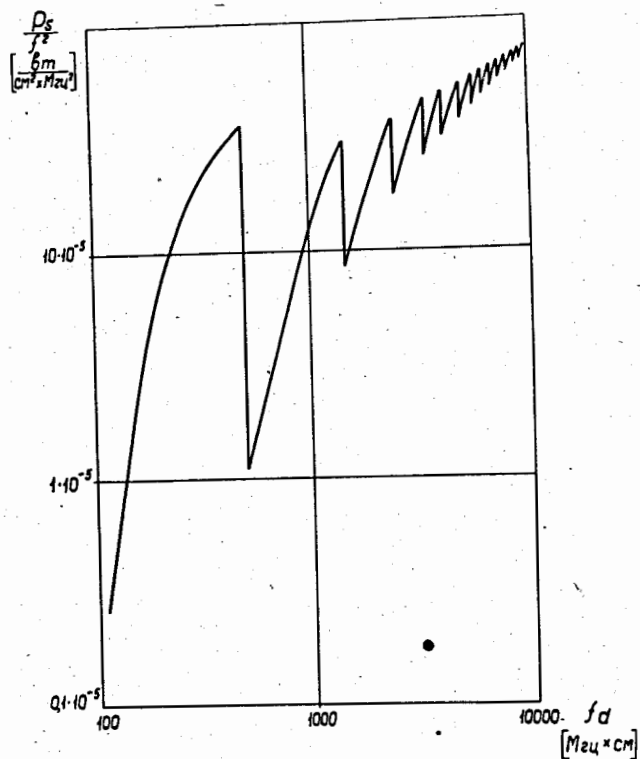


Рис. 4. Зависимость максимальной удельной мощности, поглощаемой РВР, от параметра fd .

Далее в диссертации исследуется влияние постоянных электрического и магнитного полей на РВР. Если к электродам одновременно с высокочастотным приложить постоянное напряжение, то с ростом этого напряжения произойдет сужение области фазовой устойчивости и РВР прекратится. Однако при этом возле электрода с положительным потенциалом создаются условия для возникновения так называемого одноэлектродного РВР, подавление которого требует гораздо большего напряжения смещения, чем подавление обычного РВР. При расчёте напряжения, достаточного для подавления одноэлектродного РВР, необходимо учитывать следующие факторы: нарушение фазовой устойчивости процесса РВР и уменьшение коэффициента вторичной эмиссии δ из-за увеличения энергии падающих электронов сверх некоторого критического значения $W_{k \max}$. Отсюда два значения напряжений смещения, достаточного для подавления РВР:

$$U' \geq 0,11 \frac{m d^2 \omega^2}{e}, \quad (1)$$

$$U'' \geq \frac{\omega d}{\pi e} \sqrt{\frac{m W_{k \max}}{2}}, \quad (2)$$

где m, e - масса и заряд электрона, ω - угловая частота, d - расстояние между электродами, $W_{k \max}$ - критическое значение энергии падающих электронов, выше которого коэффициент вторичной эмиссии становится меньше 1.

Расчитанное на основе экспериментально снятой зависимости одноэлектродного РВР от напряжения смещения $W_{k \max} = 900$ эв.

Это значение гораздо меньше приводимого в литературе для случая статических измерений коэффициента вторичной эмиссии. Постоянное магнитное поле, как правило, усиливает РВР благодаря дополнительной фокусировке электронов, участвующих в РВР. Магнитное поле может вызвать РВР в тех местах, где ВЧ электрическое поле сильно искривлено, например, в поле волны E_{11} .

В диссертации обращается внимание на необходимость корректного применения метода смещения для подавления РВР. Дело в том, что с подачей напряжения смещения создаются условия для появления одноэлектродного РВР, который может возникнуть даже там, где двухэлектродный РВР не возникает из-за сильной искривленности силовых линий ВЧ электрического поля. Это объясняется тем, что при одноэлектродном РВР осцилляция электронов происходит на небольшом удалении от положительного электрода, благодаря чему дефокусирующее действие ВЧ электрического поля на электроны сказывается незначительно. Для полного подавления одноэлектродного РВР необходимо, чтобы во всем пространстве, окружающем электрод с положительным потенциалом, поле смещения превосходило величину, определяемую выражениями (1) и (2) (необходимо брать меньшее из этих значений).

В диссертации приведены конкретные инженерные рекомендации по применению метода смещения для подавления РВР в резонаторах коаксиального типа. Показано, что если резонатор разрезать в торцевой части и подать смещение на центральный проводник резонатора, то создаются условия для возникновения одноэлектродного РВР внутри центрального проводника (или внутри экрана). Это объясняется тем, что внутри центрального проводника постоянное электрическое поле сильно ослабляется и становится недостаточным для подавления одноэлектродного РВР. Поэтому такой способ создания поля смещения в коаксиальном резонаторе неприемлем. Необходимо внутри резонатора (между центральным и наружным проводниками) по-

местить специальный электрод. Приводятся несколько вариантов конструкции и способов расположения такого электрода.

Основной особенностью конструкции резонатора СКУ (см. рис. 3) является наличие электрода 1, предназначенного для подавления РВР внутри резонатора, и системы плоских электродов 5, предназначенных для подавления РВР внутри экранов, возникающего только при наличии магнитного поля. Для подавления РВР внутри вакуумной части ввода мощности в резонатор применяется цилиндрический электрод, расположенный внутри ввода возле наружного проводника коаксиальной линии.

3 глава диссертации посвящена системам высокочастотного питания резонатора, а также синхронизации, контроля и управления СКУ. Приводится описание блока ВЧ генераторов, импульсного модулятора, стойки синхронизации, контрольного щитка, силовых и сигнальных панелей и пульта управления.

Максимальная паспортная длительность импульса, при которой могут работать выпускаемые промышленностью импульсные радиолампы, не превышает 1000 мксек. В связи с этим были проведены теоретические и экспериментальные исследования возможности работы существующих радиоламп "сверхдлинными" импульсами. Эти исследования показали, что при длительности импульса 20 + 30 мсек существующие лампы могут работать без существенного ухудшения своих основных параметров по сравнению с номинальным импульсным режимом. Главный ограничивающий фактор - нагрев сетки лампы за время импульса - при этой длительности не достигает критического значения.

В IV главе диссертации приводятся основные экспериментальные результаты, полученные в процессе исследования РВР, при проведении физических экспериментов по перезахвату протонов в режим кратного ускорения на частотах 69 и 150 Мгц, а также в процессе опытной эксплуатации СКУ в целом. В процессе разработки электродинамического сепаратора частиц высоких энергий ОИЯИ появилась необходимость экспериментально проверить эффективность предлагаемого метода получения

коротких сгустков вторичных частиц с требуемой скважностью путем перезахвата пучка протонов в режим кратного ускорения и последующего медленного вывода его на мишень. С этой целью была создана макетная СКУ, состоящая из резонатора, автогенератора и импульсного модулятора. При разработке макетной СКУ предусматривалось, что она должна быть достаточно простой в техническом отношении с тем, чтобы ее можно было быстро изготовить и провести необходимые физические эксперименты до завершения разработки рабочей СКУ на частоте 149,520 МГц. Частота макетной СКУ (69 МГц) была выбрана примерно в два раза меньшей частоты рабочей СКУ, что облегчило проведение исследований процессов перезахвата протонов в режим кратного ускорения и формирования ВЧ структуры вторичных частиц.

Экспериментальные исследования РВР в резонаторах СКУ на частотах 69 и 150 МГц показали, что при длительности импульса свыше 1 мсек РВР, кроме непосредственного шунтирующего действия, вызывает сильную ионизацию остаточного газа, приводящую к плазменному пробое резонатора. Поэтому необходимо подавлять все виды РВР, даже те, которые не оказывают непосредственного шунтирующего воздействия на резонатор (например, одноэлектродный РВР). Было экспериментально исследовано влияние магнитного поля на развитие РВР, подтвердившее предположения, сделанные во II-ой главе диссертации, что магнитное поле благодаря фокусирующему действию, как правило, усиливает РВР. Минимальное значение магнитного поля, при котором возникал РВР в полости экранов резонатора СКУ (без магнитного поля он там не возникал) составило $H_z = 10$ э. Увеличение магнитного поля приводило к усилению РВР. Была разработана и проверена методика отдельного исследования зависимости одноэлектродного и двухэлектродного РВР от напряжения смещения. Двухэлектродный РВР внутри резонатора СКУ на 150 МГц прекращается при напряжении смещения 150 в, тогда как для подавления одноэлектродного РВР требовалось 1100 в.

Экспериментальные исследования режима кратного ускорения проводились при кратностях ускорения $q = 48, 49, 50$ (частота 69 МГц) и $q = 104$ (частота 150 МГц). Для регистрации перезахваченного пучка была разработана специальная методика, предусматривающая использование имеющихся в синхрофазотроне индукционных электродов и сцинтилляционной бетатронной мишени. Полученные экспериментальные результаты по исследованию зависимости коэффициента перезахвата от напряжения резонатора, кратности ускорения, энергии перезахватываемых протонов, отклонения центра сепаратрисы q -ой кратности от равновесного значения энергии хорошо совпали с теорией, приведенной в I главе диссертации (см. рис. 1). Отсюда можно сделать вывод, что на частотах 69 и 150 МГц различного рода возмущения еще не оказывают существенного влияния на коэффициент перезахвата.

С помощью СКУ и системы создания азимутальной асимметрии магнитного поля было осуществлено формирование ВЧ структуры вторичных частиц и отработаны условия получения необходимой скважности и величины фона между сгустками, а с использованием ВЧ отклоняющей системы проведено успешное разделение антипротонов и π -мезонов с импульсом 5 Гэв/с.

Основные результаты настоящей работы следующие:

1. Произведен расчёт зависимости коэффициента перезахвата протонов высоких энергий в режим кратного ускорения от различных параметров системы кратного ускорения с учётом реального распределения ускоренных протонов по энергиям.
2. Разработана методика расчёта резонаторов, пригодных для ускорения протонов в диапазоне 60 + 150 МГц в синхрофазотронах с большой апертурой, то есть когда поперечные размеры вакуумной камеры сравнимы с длиной волны резонатора.
3. Произведено дальнейшее развитие и уточнение существующей теории резонансного высокочастотного разряда (РВР) с целью получения результатов, удобных для применения в инженерной практике. Рассчитаны и представлены в виде графиков

зависимости разрядного напряжения, удельной плотности тока, удельного шунтового сопротивления и максимальной мощности, потребляемой РВР, в широком интервале значений параметра $f d$ (f - частота, d - расстояние между электродами). С помощью этих зависимостей можно в каждом конкретном случае оценить шунтирующее влияние РВР на резонатор.

4. Разработаны и проведены конкретные инженерные рекомендации по подавлению РВР в резонаторах коаксиального типа с помощью напряжения смещения.

5. Рассмотрена возможность работы существующих радиоламп "сверхдлинными" импульсами, когда определяющим критерием становится нагрев электродов радиолампы за время импульса. Оценки, проведенные с помощью полученных выражений, показывают, что в основном возможности радиоламп с точки зрения предельной длительности значительно (на 1 + 2 порядка) превосходят паспортные данные.

6. Произведены экспериментальные исследования РВР в резонаторах коаксиального типа, позволившие отработать конструкцию резонатора, в которой РВР эффективно подавлялся. Показано, что при работе резонатора "сверхдлинными" импульсами необходимо подавлять все виды РВР, даже те, которые не оказывают непосредственного шунтирующего действия (например, одноэлектродный РВР).

7. Экспериментально исследован РВР при наличии магнитного поля и отработаны эффективные способы его подавления.

8. Проведено экспериментальное исследование режима кратного ускорения в синхрофазотроне ОИЯИ. Получен значительный коэффициент перезахвата в режим кратного ускорения $\sigma \approx 0,8$ и выяснены требования, предъявляемые при этом к синхрофазотрону и системе кратного ускорения. Экспериментальные результаты хорошо совпали в расчётах.

9. На основе полученных расчётных и экспериментальных результатов создана и запущена в опытную эксплуатацию оригинальная установка - система кратного ускорения протонов, с помощью которой на синхрофазотроне ОИЯИ впервые проведено

кратное ускорение протонов с энергией 10 ГэВ на частоте 150 МГц при кратности ускорения $q = 104$ с высоким коэффициентом перезахвата $\sigma \approx 0,8$. Использование ускорения на высокой кратности и специального режима вывода пучка на мишень позволило создать периодическую последовательность коротких сгустков вторичных частиц со скважностью $e \geq 7$, периодом следования $t_s = 2$ м и фоном между сгустками менее 10^{-3} , что дало возможность осуществить успешный запуск электродинамического сепаратора частиц высоких энергий ОИЯИ в целом и получить сепарированный пучок антипротонов с импульсом 5 ГэВ/с.

Основные результаты диссертации доложены на международных конференциях по ускорителям (Дубна, 1963 г., Кембридж, 1967 г.), а также изложены в работах/1-10/.

Л и т е р а т у р а

1. В.А.Вагин, А.Д.Панфилов, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов. Препринт ОИЯИ 1406, Дубна 1963 г.
2. В.А.Вагин, В.Д.Володин, А.Д.Панфилов, Н.Н.Пляшкевич, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов, Н.В.Шустров. Препринт ОИЯИ 1478, Дубна 1963 г.
3. В.А.Вагин, В.Д.Володин, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк. Препринт ОИЯИ Р13-3084, Дубна 1966 г.
4. В.А.Вагин, М.Высочанский, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, И.Фолтин. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна 1963 г.
5. В.Д.Володин, В.Н.Зубарев, С.В.Мухин, В.А.Попов, С.В.Рихвицкий, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк. Препринт ОИЯИ 2913, Дубна 1966 г.
6. Н.Г.Борисов, В.А.Вагин, В.Д.Володин, В.И.Зайцев, Н.Н.Пляшкевич, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк. Препринт ОИЯИ Р-2375, Дубна 1965 г.

7. В.А.Вагин, В.Д.Володин, Н.Н.Пляшкевич, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк. ПТЭ, № 6, 1966 г.
8. В.А.Вагин, В.Д.Володин, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк. ПТЭ, № 5, 1967 г.
9. В.А.Вагин, В.И.Векслер, В.Н.Зубарев, А.Б.Кузнецов, С.В.Мухин, В.А.Петухов, В.А.Попов, Н.Б.Рубин, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна 1963 г.
10. В.Д.Володин, В.Н.Зубарев, С.В.Мухин, В.А.Попов, С.В.Рихвицкий, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк.
11. CEAL, Proc. of the 6 Intern. Conf. of High Energy Accel. 1967, p. A-160

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1968 года.