

Ч-493

Чернов Николай Николаевич

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
СИНХРОЦИКЛОТРОНА ПИЯФ РАН
НА ЭНЕРГИЮ ПРОТОНОВ 1ГэВ**

Специальность: 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 2003

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В 1967 г. в филиале ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, г. Гатчина (ныне Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова Российской академии наук), состоялся физический пуск синхротронно-ускорителя протонов на энергию 1 ГэВ [1]. Однако максимальная энергия не была достигнута. Из-за технических трудностей, связанных с созданием высокочастотной ускоряющей системы, протоны были ускорены лишь до энергии 750 МэВ. В течение трех лет проводились работы по доведению энергии протонов до проектной величины путем введения ряда изменений в конструкцию вариатора частоты, а также были разработаны и выполнены дополнительные устройства: оригинальная система временной растяжки пучка, система вертикального сброса пучка на нейтронно-образующую мишень, метод улучшения монохроматизации ускоренных протонов, система вывода [2 – 7]. С 1970 г. началась регулярная эксплуатация синхроциклотрона при энергии пучка протонов 1 ГэВ. В процессе многолетней эксплуатации были сделаны усовершенствования, которые поставили ускоритель в ряд уникальных установок. Исследования в области ядерной физики, благодаря оптимальной энергии протонов (1 ГэВ), относительно высокой монохроматичности пучка (0,3 МэВ) и хорошей временной структуре, позволили получить на ускорителе ряд ценных научных результатов [8] как в области физики ядра, физики элементарных частиц, так и для ядер вдали от полосы стабильности, особенно для нейтронно-избыточных ядер (установка ИРИС).

Следует отметить также, что энергия протонов 1 ГэВ оказалась весьма полезной и для прикладных исследований в области ядерной физики, т.к. она практически совпала с энергией протонов радиационного пояса Земли, что позволило использовать пучок протонов синхроциклотрона для испытания элементов электроники и материалов космической техники на радиационную устойчивость [9]. Эти работы проводятся и в настоящее время.

Целью диссертационной работы было создание высокочастотного ускоряющего комплекса синхроциклотрона ПИЯФ РАН на энергию протонов 1 ГэВ, включая:

1. Введение изменений в конструкцию и схему вариатора частоты в процессе наладки резонансной системы (дуант-вариатор частоты) для получения энергии протонов 1 ГэВ.
2. Разработку и создание системы связи лампового генератора с резонансной системой ускорителя.
3. Разработку и создание дополнительной системы медленного ускорения в конце цикла ускорения для обеспечения временной растяжки пучка с высокой эффективностью (~100%) перехода частиц из основного режима ускорения в режим растяжки во времени.
4. Обеспечение стабильности и повторяемости распределения частиц в макроимпульсе растянутого по времени пучка протонов.

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.Константинова Российской академии наук, г. Гатчина.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор - Глазов Алим Алексеевич,
доктор физ.-мат. наук, профессор - Найденов Виктор Олегович,
доктор технических наук, профессор - Федотов Аркадий Павлович.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, С.-Петербург.

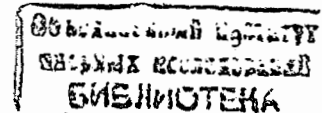
Защита состоится «19» ноября 2003 года в
_____ часов _____ мин. на заседании Диссертационного совета Д-720.001.05
Лаборатории физики частиц ОИЯИ, Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «13» октября 2003 г.

Учёный секретарь

Диссертационного совета:  (Кривохижин В.Г.)



5. Разработку и создание системы вертикального импульсного сброса протонов на нейтронную мишень с использованием Си-электрода с целью получения нейтронных пучков для обеспечения работы времяпролетного спектрометра.

Научная новизна и практическая ценность

При построении высокочастотной системы синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ необходимо было учесть ряд особенностей, существенно отличающих ее от других ускорителей этого типа.

1. Для получения энергии протонов 1 ГэВ требуется более широкий диапазон частот с перекрытием от 30-12 МГц. В этом широком частотном диапазоне необходимо обеспечить возбуждение высокочастотных колебаний амплитудой не ниже 15кВ на ускоряющем дуанте при падении ускоряющего напряжения – не более 50% в конце диапазона, подавить паразитные колебания системы (объемные, поперечные, собственные частоты вариаторов и др.). Для этого необходимо было изменить конструкцию вариатора частоты и экспериментально подобрать некоторые элементы вариатора частоты. Предложенная и осуществленная на уровне изобретения новая симметричная система связи позволила надежно подавить поперечные колебания системы [10].

2. На всех существующих синхроциклотронах основная ускоряющая система и дополнительная, обеспечивающая растяжку пучка во времени, между собой не связаны. После основного ускорения несогласованное включение второго генератора не обеспечивает полный переход частиц из одного режима в другой и обуславливает фазовые потери частиц, достигающие на некоторых ускорителях 50%. Уменьшение этих потерь достигается за счет значительного увеличения напряжения на ускоряющем электроде (увеличения мощности генератора). На ускорителе ПИЯФ РАН эти системы образуют единый комплекс, который посредством синхронизированной работы обеспечивает полный переход частиц от основного режима ускорения в режим растяжки пучка во времени при относительно низком напряжении на Си-электроде [11]. Снижение напряжения позволило реализовать резонансную схему генератора растяжки, что дало значительную, до 3 МВт/час в сутки экономию электроэнергии.

3. С целью расширения возможностей использования ускорителя получение вторичных пучков нейтронов на ускорителе ПИЯФ РАН обеспечивается с помощью тех же Си-электродов, которые в отличие от других ускорителей выполнены в виде разделенных пластин, а разработанная схема их подключения обеспечивает независимую работу как в режиме временной растяжки пучка, так и в режиме вертикального импульсного сброса без каких-либо переключений в схеме [12], что существенно повышает эффективность использования ускорителя.

В результате проведенных исследований и разработок был создан высокочастотный комплекс, отличающийся новизной, которая подтверждается тремя авторскими свидетельствами [10 – 14].

Автор защищает научную разработку и создание высокочастотного ускорительного комплекса синхроциклотрона на энергию 1ГэВ, включая:

1. Конструктивные изменения вариатора частоты, внесенные в процессе наладки высокочастотной системы, обеспечившие получение необходимого частотного диапазона и выведение частоты паразитных контуров вариатора за границы рабочего диапазона.

2. Устройство связи генераторной лампы с резонансной системой ускорителя.

3. Устройство системы временной растяжки выведенного пучка протонов и способ уменьшения потерь частиц при переходе в режим временной растяжки пучка посредством синхронизации частоты и фазы генератора Си-электрода с основной частотной программой.

4. Метод повышения стабильности и энергетического распределения во времени выведенного пучка протонов осуществлением синхронизации генератора Си-электрода с фазой циркулирующего сгустка протонов.

5. Способ совмещения работы Си-электрода в режимах временной растяжки и однооборотного вертикального сброса протонов на нейтронную мишень.

В результате проведенных исследований и внедрения изобретений получена практически предельная для синхроциклотрона энергия протонов 1 ГэВ, что позволило выполнить ряд ценных физических исследований в области физики элементарных частиц, и особенно ядерной физики. Достигнутая энергия 1 ГэВ, совпадающая с энергией протонов радиационного пояса Земли обеспечила постановку опытов на радиационную стойкость ряда материалов и изделий электронной техники для космических программ. Применение резонансной схемы в генераторе временной растяжки дало значительную экономию электроэнергии. Таким образом, в диссертации изложены научно обоснованные технические решения, реализация которых позволила создать синхроциклотрон с предельной для этого типа ускорителя энергией протонов.

Сообщения и публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в журнале "Техническая физика", том 40, 41, 1970, 1971 гг., и докладывались на Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц; на VII Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Ереван), 1970 г.; на Национальной конференции США (Сан-Франциско), 1973 г., на II, 1970 г., III, 1973 г., IV, 1976 г. и VII, 1980 г. Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, на III Всесоюзной конференции по нейтронной физике, 1975 г. (Киев, ЦНИИ атоминформ, 1976 г., т. 6 стр. 221), изданы в сборнике «Методические и прикладные работы ЛИЯФ», 1988 г., стр. 171. На новые технические решения получены авторские свидетельства на изобретения (№ 270131, 1970 г., № 370901, 1972 г., № 497934, 1975 г.), которые внедрены в полном объеме.

Содержание работы:

Введение содержит формулировку основной цели работы и обоснование актуальности поставленной задачи.

Первая глава содержит описание основных особенностей высокочастотной системы синхроциклотрона. Приводится оценка параметров системы, рассматриваются возможные типы паразитных колебаний резонансной системы и основные принципы построения вариатора частоты в соответствии с предложенной НИИЭФА им. Ефремова конструкцией вариатора частоты^{1,2,3}. Формулируются требования к диапазону изменения частоты системы.

Вторая глава содержит экспериментальные результаты измерения основных параметров высокочастотной системы, полученные непосредственно на изготовленной резонансной системе по проекту НИИЭФА.

Измерение резонансной частоты при минимальной и максимальной емкостях вариатора показало, что необходимое перекрытие по частоте не может быть получено. Для выяснения причины этого необходимы измерения характеристик как системы дуант-камеры, так и вариатора частоты отдельно. Все эти исследования проводились непосредственно на месте монтажа ускорителя после того, как были смонтированы дуант и вакуумная камера, а вариатор частоты установлен на специальном стенде в сборе с дуантным пакетом.

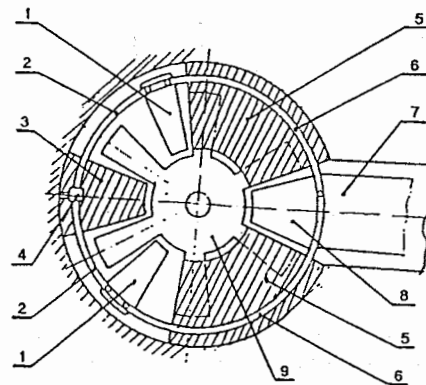
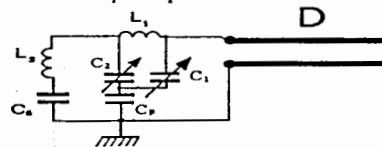
Систему дуант-камеры, показанную на рис. 1 для рабочего типа колебаний синхроциклотрона, можно рассматривать как полуволновую резонансную неоднородную линию, электромагнитное поле которой сосредоточено в области между наружными стенками дуанта и внутренними стенками камеры (полюсами магнита). Ее неоднородность достигается за счет формы дуанта и переменной величины зазора между дуантом и внутренними горизонтальными стенками камеры. Изменение электрической длины линии системы дуант-камеры производится переменной емкостью (вариаторами). Как известно, для неоднородной линии коэффициент перестройки ее электрической длины может быть сделан больше двух. Были измерены: собственные резонансные частоты дуанта (без вариаторов и основного генератора), входное реактивное сопротивление дуанта X_d в диапазоне рабочих частот со стороны подключения вариаторов, коэффициент передачи напряжения η_d , определяемый как отношение напряжений в ускоряющей щели к напряжению в месте подключения вариаторов; а также выяснено наличие паразитных резонансов системы дуант-камеры.

¹ И.М.Ройфе, Е.В.Середенко. Препринт НИИЭФА, Т-0122, 1970 г.

² И.М.Ройфе, Е.В.Середенко. "Некоторые особенности высокочастотной системы синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ". ЖТФ, 1971 г., т. 41, в.9, стр. 1797.

³ И.М.Ройфе, Е.В.Середенко и др. "Высокочастотная система синхроциклотрона". Авторское свидетельство № 291655. Бюллетень изобретений № 1, 1972 г.

Перестройка резонансной частоты системы производилась путем подключения к дуанту конденсаторов определенной величины в виде плоских пластин размером $500 \times 100 \text{ мм}^2$ с диэлектриком из полиэтилена или плексигласа разной толщины, подсоединенных к дуанту по всей длине подключения вариаторов.



- 1 Верхние и нижние индуктивные пакеты - C_2 .
- 2 Задние части индуктивных колец - L_2 .
- 3 Задний земляной пакет - часть C_3 .
- 4 Задняя заземляющая дужка - L_1 .
- 5 Верхний и нижний земляные пакеты, часть C_3 .
- 6 Передняя часть индуктивных колец - L_1 .
- 7 Дуант.
- 8 Дуантный пакет.
- 9 Ротор вариатора.

Схема вариатора частоты (положение ротора $\alpha = 0^\circ$)

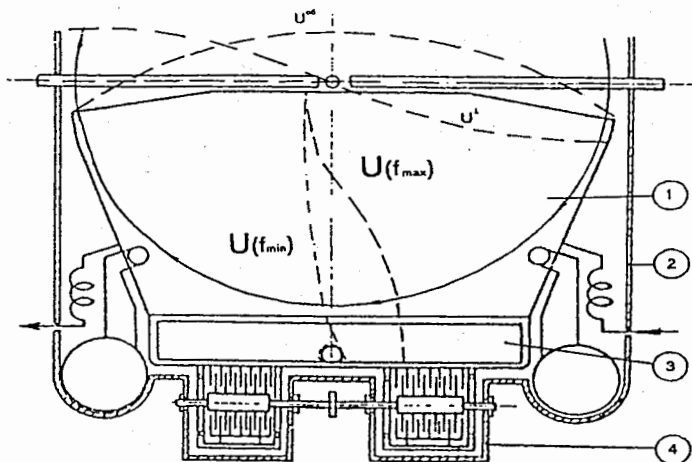


Рис.1. Резонансная система синхроциклотрона

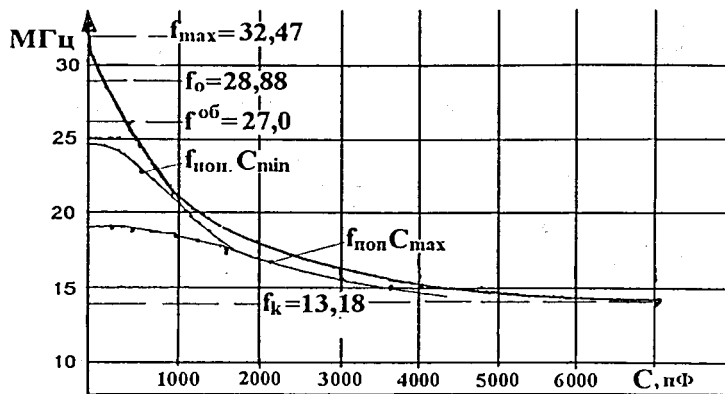


Рис.2. Зависимость резонансных частот дуанта от величины подключаемой ёмкости

На рис. 2 приведена зависимость изменения резонансной частоты системы дуант-камеры от величины емкости, подключаемой к дуанту.

Граничные частоты при полностью разомкнутом и замкнутом дуанте соответственно равны:

$f_{\max} = 32,47$ МГц; $f_{\min} = 10,07$ МГц, что перекрывает необходимые значения f_0 и f_k для граничных частот, приведенных в таблице 1. При этом коэффициент перекрытия системы дуант-камеры

$$\eta = f_{\max} / f_{\min} = 3,04.$$

Величины входного реактивного сопротивления дуанта $X_d(f)$ и коэффициента передачи напряжения $p_d(f)$ в зависимости от частоты приведены на рис. 3, 4. Значения X_d рассчитывались из кривой $f(C)$, а величины p_d измерялись экспериментально. При измерении p_d возбуждение системы производилось от внешнего генератора, подключенного в месте подсоединения вариаторов.

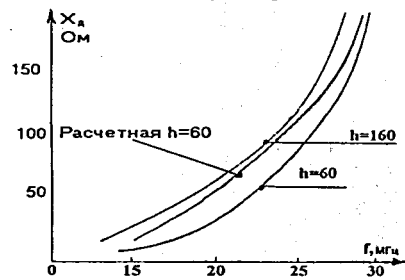


Рис.3. Зависимость реактивного сопротивления дуанта от частоты

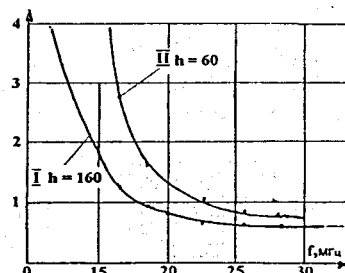


Рис.4. Зависимость коэффициента передачи напряжения от частоты

В высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона наряду с электромагнитными колебаниями рабочего типа, используемыми для ускорения частиц, могут возникать паразитные колебания, которые нарушают нормальный процесс ускорения.

Известно, что в действующих синхроциклотронах имели место следующие виды паразитных колебаний системы дуант-камеры:

- 1) объемные колебания;
- 2) поперечные колебания;
- 3) колебания паразитных контуров вспомогательных элементов;
- 4) высшие моды продольных колебаний.

При проведении измерений на системе дуант-камеры наблюдалось возбуждение объемных колебаний в полости камеры на частоте ~ 27 МГц, по виду напоминающее моду E_{010} для цилиндрической полости. Частота определялась по максимуму амплитуды высокочастотного напряжения, получаемого с датчика, подключенного к верхней и нижней крышкам камеры вблизи её центра. Мода колебаний определялась микроамперметром с высокочастотным термопреобразователем, имеющим наружную, ориентируемую в пространстве, рамку.

Резонансные частоты поперечных колебаний дуанта определяются не только формой, размерами и положением дуанта относительно поверхностей камеры, но и величиной подключенной к нему ёмкости, т.е. зависят от угла поворота вариаторов.

При возбуждении основной моды поперечных колебаний в системе узел напряжений располагается по продольной оси симметрии дуанта, амплитуда высокочастотного напряжения растёт слева и справа от продольной оси, достигая максимума по боковой периферии дуанта, и имеет противоположные фазы.

Для возбуждения поперечных колебаний необходимо, чтобы в автоколебательной системе существовала асимметрия относительно вертикальной плоскости, проходящей вдоль оси дуанта.

В системе дуант-камеры наблюдалось возбуждение основной моды поперечных колебаний, лежащих в диапазоне частот $25 \div 15$ МГц.

Таким образом, в результате радиочастотных измерений, проведенных на системе дуант-камеры (без вариаторов и основного генератора), было установлено:

1. Диапазон частот системы дуант-камеры,

$$f_{\max} = 32,47 \text{ МГц,}$$

$$f_{\min} = 10,07 \text{ МГц,}$$

$$\eta = f_{\max} / f_{\min} = 3,04,$$

перекрывает необходимые значения f_0 и f_k для протонного и дейтронного диапазонов.

2. Паразитная частота объемных колебаний камеры $f^{об} = 27$ МГц лежит внутри частот рабочего диапазона, что может приводить к его разрыву.

3. Паразитные резонансные частоты основной моды поперечных колебаний $f \approx 25 \div 15$ МГц также лежат в пределах частот рабочего

диапазона, что может приводить к перескоку основного генератора с частоты рабочей программы на частоту поперечных колебаний.

На изолированных от ускоряющей системы вариаторах проводились радиочастотные измерения с целью определения их параметров. Были измерены параметры отдельных элементов вариаторов, определены значения резонансных частот, измерены величины C^{\min} и C^{\max} и выяснены паразитные резонансы, обусловленные конструктивными особенностями вариаторов.

Поскольку вариаторы представляют собой систему с распределенными параметрами, проведение точных измерений представляет известные трудности, а полученные в результате измерений параметры вариаторов необходимо считать ориентировочными.

Измеренные величины $C_{\text{эфф}}(0^\circ)$ в диапазоне частот 25÷33 МГц и $C_{\text{эфф}}(39^\circ)$ в диапазоне 12÷16 МГц приведены на рис. 5.

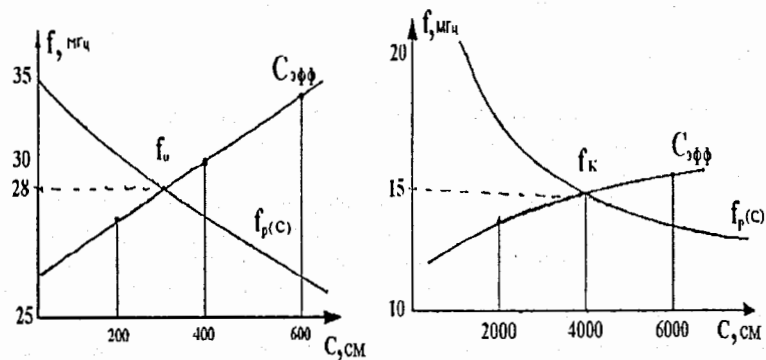


Рис. 5. Определение начальной и конечной резонансных частот системы

Здесь же нанесена зависимость резонансной частоты дуанта от величины емкости, подключаемой к его концу, $f^0 = f^0(C)$. Пересечение этих кривых дает значение граничных частот всей системы в целом.

В дальнейшем было выяснено, что измеренные величины $f_0 f_k$ хорошо согласуются со значениями граничных частот, полученных на полностью собранной ускоряющей системе.

Результаты измерений резонансных частот системы дуант-вариатора в сборе приведены на рис. 6.

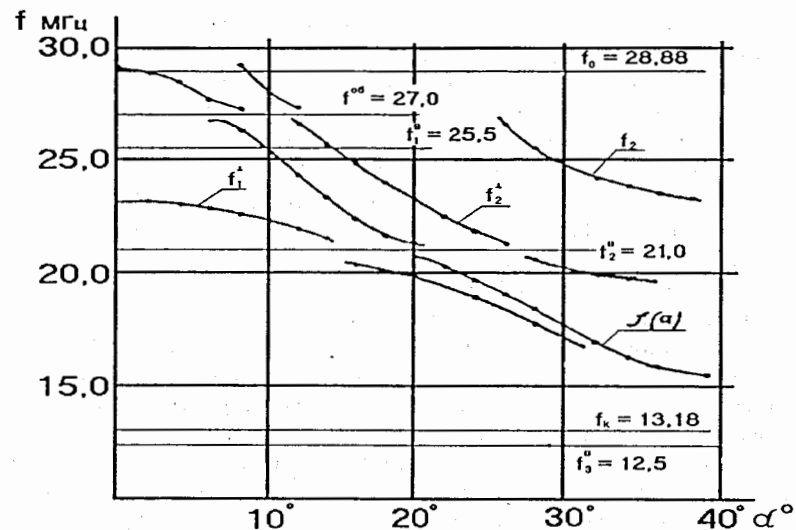


Рис. 6. Резонансные частоты ускоряющей системы

- $f(\alpha)$ - рабочая частота системы, соответствующая основной продольной моде колебаний;
- f_2 - вторая частота системы, соответствующая так же основной моде колебаний;
- f_1^1 и f_1^2 - частоты поперечных колебаний системы;
- f^{0B} - паразитная частота объемных колебаний камеры;
- f_1^B, f_2^B, f_3^B - паразитные частоты возбуждения вариаторов.

Из рис. 6 следует, что:

1. Получившийся рабочий диапазон для резонансной системы, собранной в соответствии с проектом НИИЭФА,

$f_{\max} = 29,0$ МГц, $f_{\min} = 15,5$ МГц, меньше необходимого для ускорения протонов до энергии в 1 ГэВ и согласуется с величинами, полученными независимо при измерениях на эквиваленте дуанта и одном вариаторе, что описано выше.

2. Все паразитные резонансы f_0^6 , f_1^8 и f_2^8 , обнаруженные ранее, приводят к разрывам рабочей частотной программы. Нерабочие частотные программы f_2 , f_1^1 и f_2^1 также претерпевают разрывы в местах совпадения с частотами паразитных резонансов. Отсутствие разрывов в районе 25,5 МГц объясняется тем, что при снятии кривых паразитный резонанс вариатора $f_1^8 = 25,5$ МГц был предварительно уведен вверх за пределы рабочего диапазона за счет снятия части полицилиндрических конденсаторов с осей роторов вариаторов.

Третья глава содержит описание изменений, внесенных в конструкцию вариатора частоты с целью получения необходимых характеристик.

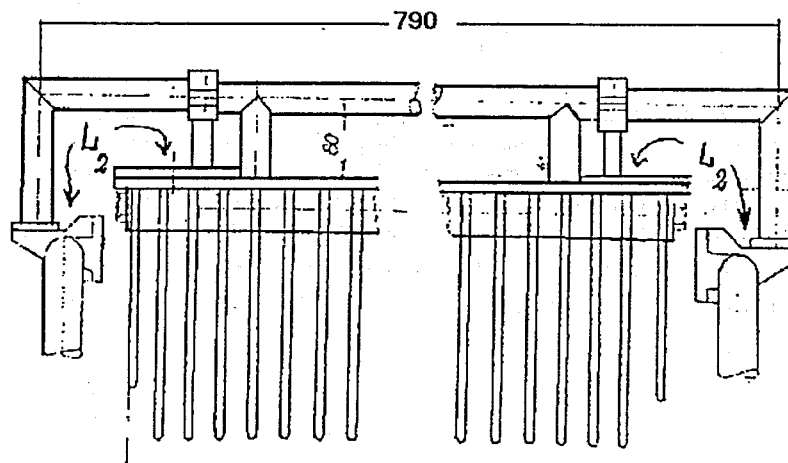
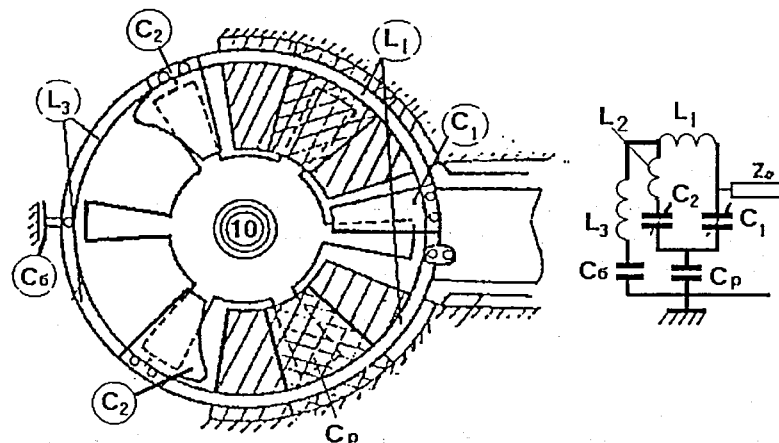
Для ускорения на синхроциклотроне протонов до энергии в 1 ГэВ необходимо иметь рабочий диапазон частот: $f_{\max} \approx 30$ МГц, $f_{\min} \approx 13,18$ МГц, таким образом, полученный диапазон частот $f_{\max} = 29$ МГц, $f_{\min} = 15,5$ МГц необходимо было расширить на 1 МГц в область верхних частот и на 2,3 МГц в область нижних частот.

Величина индуктивности L_3 была уменьшена за счет новой конструкции задних заземляющих дужек, а величина L_2 увеличена за счет полной переделки конструкции крепления индуктивных пакетов. Если в конструкции вариаторов по первоначальному проекту НИИЭФА L_2 – это паразитная индуктивность подсоединения пакетов, то в новой конструкции индуктивность L_2 была образована с помощью П-образных стоек крепления индуктивных пакетов к кольцевым дугам. Скользящие закоротки позволяли легко менять величину индуктивности L_2 . Ширина дуантного пакета была сокращена за счёт его нижней части, что уменьшило начальную ёмкость вариатора.

Варьируя величинами L_2 и меняя длину заземляющей дуги, можно независимо регулировать верхнюю и нижнюю границы рабочего диапазона, изменяя эффективную величину емкости вариатора.

Проведенные изменения в конструкции вариаторов позволили получить диапазон частот $f_{\max} = 30,3$ МГц; $f_{\min} = 13,0$ МГц.

Элементы измененной конструкции вариатора показаны на рис.7.



- C_1 - ёмкость дуантного пакета;
- C_2 - ёмкость индуктивного пакета;
- C_6 - ёмкость блокировочного конденсатора;
- C_p - ёмкость ротора, создаваемая земляными пакетами и полицилиндрами;
- Z_0 - дуант.

Рис. 7. Измененная конструкция вариатора

Скорость набора энергии частицы в синхроциклотроне

$$\frac{dE}{dt} = 2eV \cos \phi_s f, \quad \text{где } e - \text{заряд частицы};$$

V – амплитуда высокочастотного напряжения;

ϕ_s – равновесная фаза;

f – частота обращения частицы в данный момент. Учитывая, что

$\alpha = 6Nt$, где N – число оборотов вариатора в минуту, α – угол поворота в градусах, и подставляя

$$dt = \frac{1}{6N} \cdot d\alpha, \quad \text{получим} \quad \cos \phi_s = \frac{6N}{2eVf} \frac{dE}{d\alpha}. \quad (10.1)$$

Используя зависимость E от f и полагая $eV \cos \phi_s$ постоянной величиной (условие минимума потерь частиц), можем проинтегрировать уравнение

$$d\alpha = \frac{3N}{eV \cos \phi_s} \cdot \frac{dE}{f} \quad (10.2)$$

и получить необходимую идеальную форму кривой $f(\alpha)$. Такая кривая была рассчитана, и её форма приведена на рис. 8. На этом рисунке также приведена реальная зависимость частотной кривой $f_1(\alpha)$ синхроциклотрона, полученная при индуктивных пакетах по первоначальному проекту.

Из сравнения кривых $f_1(\alpha)$ и $f(\alpha)$ видно, что наибольшее отклонение реальной кривой $f_1(\alpha)$ от идеальной имеет место в районе частоты захвата f_0 , где производная $\frac{df}{d\alpha}$ гораздо меньше требуемой по расчету, и в диапазоне углов $\alpha \approx 15^\circ \div 30^\circ$.

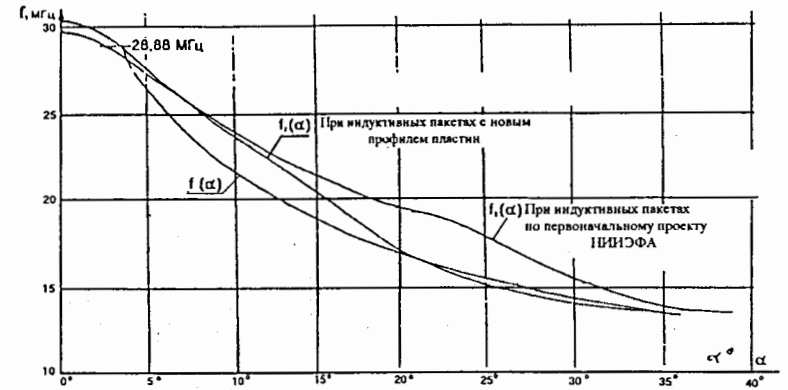


Рис. 8. Зависимость резонансной частоты системы от угла поворота ротора вариатора

На рис.9 приведены зависимости поведения равновесной фазы от угла поворота ротора вариаторов для различных значений оборотов вариатора N при ускоряющем напряжении 10 кВ. Кривые рассчитывались для реального распределения амплитуды ускоряющего поля от частоты, вид которого представлен на рис.10. Видно, что действительно в районе частоты захвата $\alpha \approx 3,5^\circ$ из-за малой величины производной $df/d\alpha$ значения $\cos \phi_s$ малы и не обеспечивают оптимальных условий захвата протонов в режим ускорения. А в диапазоне углов $\alpha = 25^\circ - 39^\circ$, наоборот, величина производной $df/d\alpha$ велика, и значения $\cos \phi_s$ резко возрастают. Так как $\cos \phi_s$ не может быть больше единицы, то такое возрастание величины $\cos \phi_s$ ограничивает максимально возможные обороты ротора вариаторов, т.е. частоту модуляции, а следовательно и интенсивность ускорителя.

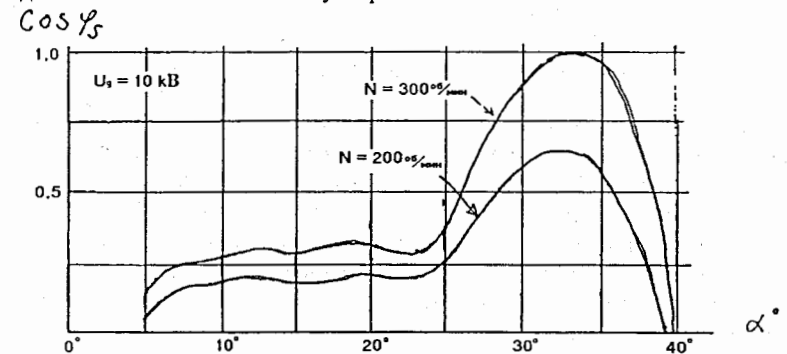


Рис.9. Зависимость равновесной фазы от угла поворота вариатора (проектный вариант)

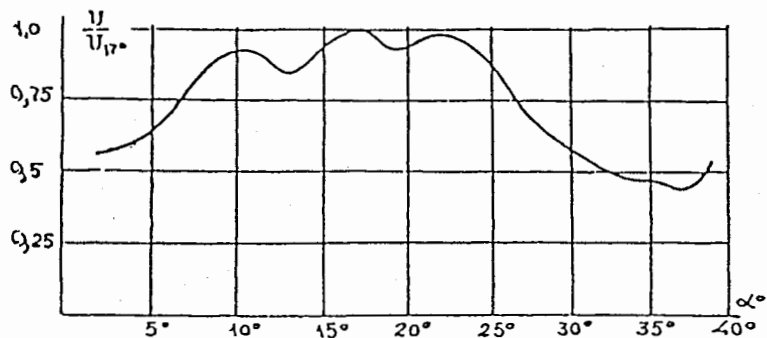


Рис. 10. Изменение напряжения на конце дуанта от угла поворота ротора

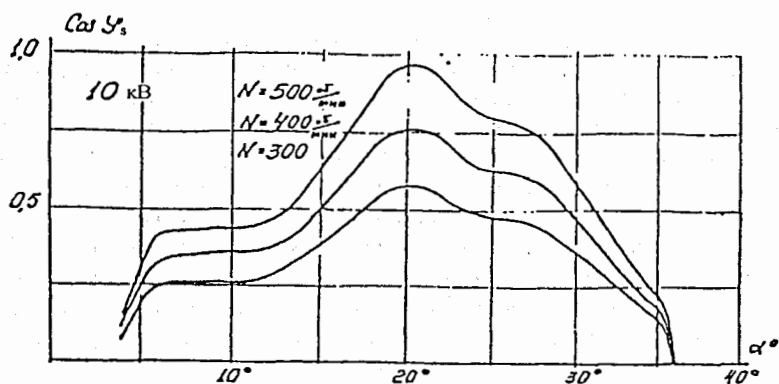


Рис. 11. $\text{Cos}\phi_s$ при измененной форме индуктивных пакетов

Форма частотной кривой была частично исправлена путем изготовления новых индуктивных пакетов с лопатками сложного профиля. После моделирования и ряда проб были изготовлены новые пластины для индуктивных пакетов, профиль которых показан на рис.7. Индуктивные пакеты были сдвинуты по углу α на 3° , так, чтобы весь рабочий цикл был ограничен диапазоном в 36° . Получившаяся при этом новая форма частотной кривой $f_2(\alpha)$ приведена на рис.8. Видно, что величина производной $df/d\alpha$ в районе частоты захвата несколько увеличилась, а в диапазоне углов $\alpha = 20^\circ - 36^\circ$ уменьшилась и приблизилась к расчетной. Величина $\text{Cos}\phi_s$ уменьшилась примерно на 30 - 40%. При 10 кВ на щели дуанта при старых индуктивных пакетах максимально возможны обороты вариатора $N_{\text{max}} = 300$ об/мин, а для новых $N_{\text{max}} = 500$ об/мин. (рис. 11). Это позволило увеличить в 1,5 раза поток ускоренных протонов.

Паразитные резонансы вариаторов, попадающие в рабочий диапазон, приводят к разрывам программы в районе частот $f_1^a = 25,5$ МГц и $f_2^a = 21$ МГц. Если паразитный резонанс вала роторов f_1^a удавалось сместить за границу рабочего диапазона путем уменьшения величины ёмкости полицилиндрических конденсаторов, то для ликвидации разрывов из-за паразитного кольцевого резонанса вариаторов f_2^a не удалось найти никакого другого способа, кроме полной переделки конструкции земляных пакетов. При этом необходимо было учитывать, что уменьшение ёмкости ротора вариаторов на землю C_p^1 как за счет полицилиндрических конденсаторов, так и за счет земляных пакетов будет приводить к возрастанию напряжения на валу ротора вариаторов, величина которого по проекту не должна превышать 4,5 - 5 кВ.

Новые земляные пакеты были сконструированы так, чтобы величина ёмкости ротора вариаторов на землю увеличивалась с увеличением угла α (с уменьшением частоты) и достигала бы своего максимального значения в конце рабочей программы. Так как величина ёмкости земляных пакетов определяет величины паразитных резонансов f_1^a и f_2^a , то при новой конструкции значения этих резонансов становятся зависящими от угла α . Новые верхние и нижние земляные пакеты имели 36 - градусную ширину (вместо 78 - градусной старой) и были расположены по окружности (по углу α) так, чтобы значения $f_1^a(\alpha)$ и $f_2^a(\alpha)$ лежали выше частоты $f(\alpha)$ во всем рабочем диапазоне. При этом вхождение лопаток ротора в земляные пакеты начиналось при $\alpha = 3^\circ$.

Значение коэффициента перенапряжения K для системы с новыми верхними и нижними земляными пакетами и полным комплектом полицилиндров достигает величины $K = 0,3$ и позволяет получить ускоряющее напряжение на дуанте до 16 кВ.

При наладке высокочастотной системы синхроциклотрона особое внимание было уделено ее симметрированию, исходя из двух очевидных требований:

- с точки зрения получения постоянной амплитуды напряжения вдоль ускоряющей щели, а также сверху и снизу от кромки дуанта, система должна быть электрически симметрична по отношению как к медианной плоскости, так и к вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось системы; такая симметрия должна выполняться во всем диапазоне рабочих частот;

- с точки зрения устранения влияния на основную программу паразитных колебаний (объемные колебания камеры, поперечные колебания системы и др.) вся система в целом или отдельные ее элементы должны быть отсимметрированы таким образом, чтобы эти паразитные колебания не возбуждались; в принципе, оба вида симметрирования не совпадают и требуют компромиссного решения.

Симметрирование системы с целью получения постоянной амплитуды напряжения вдоль ускоряющей щели, а также сверху и снизу от кромок дуанта производилось путем тщательной сборки ее элементов. Особое внимание было уделено положению дуанта относительно верхней и нижней крышек камеры и визуально контролировалось с помощью системы реперных точек.

Вариаторы симметрировались как по отдельным элементам конструкции каждого из вариаторов, так и между собой. Требования к симметрии между обоими вариаторами оказались жесткими. Так, например, при развороте одного из вариаторов по углу α относительно другого на величину $\Delta\alpha = 1^\circ$ перекося в напряжении вдоль ускоряющей щели достигал величины $20 \div 30\%$, и распределение зависело от угла α (частоты). Поэтому практически симметрирование вариаторов по углу производилось только в середине программы на частоте в 20 МГц. Такое симметрирование системы позволило получить отклонение не более 10% напряжения по щели дуанта.

Для устранения возбуждения объемных колебаний камеры производилось симметрирование системы относительно медианной плоскости на частоте $f^{об} = 27$ МГц с помощью задних регулируемых плакировок, при этом, если симметрирование производилось на $f^{об} = 27$ МГц рабочего хода изменения частоты, то на обратном ходе наблюдался разрыв частотной программы $\sim 0,3$ МГц и наоборот. Отсимметрировать систему одновременно на рабочем и обратном ходе изменения частоты с помощью регулировок, находящихся только в камере, невозможно, так как вариаторы несимметричны относительно медианной плоскости. Для задних плакировок была сделана дистанционная регулировка их положения с командного пульта управления работой синхроциклотрона. Симметрирование системы производилось на частоте $f^{об} = 27$ МГц по форме огибающей амплитуды высокочастотного напряжения, получаемого с емкостного делителя, расположенного около ускоряющей щели.

Такой способ симметрирования системы позволил полностью избавиться от возбуждения паразитных, объемных колебаний на частоте $f^{об} = 27$ МГц и их влияния на основную программу.

Исследования, проведенные на резонансной системе, и выполненные конструктивные изменения вариаторов частоты позволили:

1. Получить необходимый диапазон рабочих частот ускоряющей системы, $f_{max} = 30,03$ МГц, $f_{min} = 13,32$ МГц, путем уменьшения величины индуктивности заземляющих дуг и введения регулируемой индуктивности L_2 .
2. Устранить разрыв в частотной программе на частоте объемных колебаний камеры $f^{об} = 27$ МГц путем тщательного симметрирования системы относительно средней плоскости с помощью задних регулируемых плакировок.

3. Устранить разрывы программы на частотах возбуждения вариаторов $f_1^a = 25,5$ МГц и $f_2^a = 21$ МГц путем изготовления новых тридцатишестиградусных верхних и нижних земляных пакетов.
4. Выяснить поведение поперечных типов колебаний и определить путь устранения влияния их на возбуждение колебаний основной программы.
5. Выяснить влияние асимметрии вариаторов на распределение напряжения в системе.
6. Исправить форму частотной кривой $f(\alpha)$ путем изготовления новых индуктивных пластин сложного профиля и смещения расположения индуктивных пакетов по углу α на 3° , что позволило увеличить частоту циклов ускорения и, соответственно, интенсивность ускорения более чем в 1,5 раза.

В четвертой главе рассмотрены методы возбуждения высокочастотных колебаний в резонансной системе синхроциклотрона и приведена схема, реализованная на синхроциклотроне 1 ГэВ.

Для возбуждения резонансной системы синхроциклотрона на 1 ГэВ в соответствии с проектом НИИЭФА первоначально было применено асимметричное относительно продольной оси дуанта устройство связи. Анод лампового блока с помощью фидера подсоединен к одному вариатору, катод связан с другим вариатором. Это устройство связи подобно примененному на синхроциклотроне в Беркли США. В такой системе положительная обратная связь имеет место лишь для продольного типа колебаний $f(\alpha)$, а для поперечного типа $f^A(\alpha)$ напряжение на катоде оказывается в противофазе. Фидеры прямой и обратной связи были подсоединены симметрично к левому и правому вариаторам в точках их подсоединения к дуанту. Частотные характеристики обоих фидеров были идентичны. Для получения необходимого коэффициента обратной связи фидер обратной связи был подсоединен к катоду генераторной лампы через емкостной делитель.

Высокочастотная система оказалась чрезвычайно критичной к симметрии резонансной системы, особенно к сборке вариаторов частоты. Малейшая асимметрия приводила к уменьшению напряжения в конце цикла, а при большей асимметрии — даже к перескоку на поперечную моду колебаний. Возникла необходимость в разработке другой системы связи и подборе ее элементов экспериментальным путем, схема её представлена на рис. 12 [9].

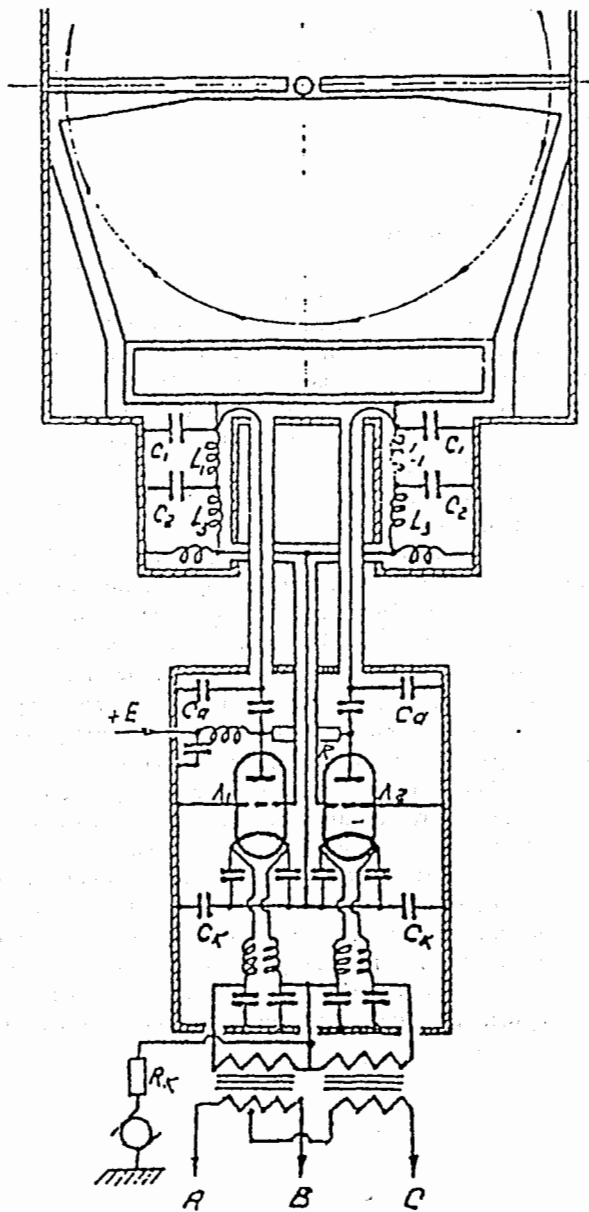


Рис. 12. Симметричная система связи

Сложность такой проблемы хорошо проанализирована в работе А.А.Глазова⁴. Путем последовательного измерения параметров генератора, резонансной системы и подбора характеристик системы связи была разработана симметричная система прямой связи. Передача напряжения осуществлялась через два фидера, подключенные симметрично к правому и левому вариаторам в местах их подсоединения к дуанту.

При использовании симметричной прямой связи была также применена симметричная обратная связь - Т-образный симметричный фидер. На симметричное устройство связи генераторных ламп с резонансной системой синхроциклотрона получено авторское свидетельство [10]. Такая система позволила:

- во-первых, значительно снизить требования к симметрии вариаторов, так как два фидера прямой связи усредняют эквивалентные сопротивления двух точек системы, приведенные к анодам генераторных ламп, а симметричная обратная связь усредняет коэффициент обратной связи и улучшает условия возбуждения на рабочем типе колебаний;

- во-вторых, существенно уменьшить эквивалентное сопротивление резонансной системы, приведенное к анодам, на частотах поперечных колебаний, а также уменьшить коэффициент обратной связи на частотах поперечных колебаний по сравнению с рабочей программой, что позволило надежно избавиться от срывов рабочих колебаний;

- в-третьих, исключить возбуждение системы на частотах П - диапазона вариатора, так как обратная связь взята с элементов, на которых вторая программа слабо выражена.

Коэффициент трансформации напряжения $n(f)$ в такой системе легко регулируется с помощью согласующей емкости C_a (350-500 пФ). При $C_a=500$ пФ $n(f)$ изменяется по диапазону частот всего на 30%. Коэффициент обратной связи регулируется емкостью C_k , которая для уменьшения фазового сдвига между катодом и анодом выбрана достаточно большой, $C_k = 2500$ пФ.

Повторный пуск ускорителя с этой системой связи и конструктивными переделками вариатора частоты позволил получить ускоряющее напряжение на дуанте ~ 10 кВ в начале диапазона и 5 кВ в конце диапазона, что обеспечило получение необходимой энергии 1 ГэВ и интенсивности выведенного пучка $1,5 \times 10^{12}$ протонов в секунду.

⁴ А.А.Глазов, "Высокочастотный генератор и система связи сильноточного фазотрона ОИЯИ". Труды V Всесоюзного Совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, октябрь 1976 года, стр.162 - 165.

Кратковременное увеличение напряжения до 15 кВ увеличивало интенсивность пучка в два раза. Основной причиной, ограничивающей ускоряющее напряжение, было повышение напряжения на валах вариаторов частоты, которое приводило к перегреву и деформации полицилиндрических конденсаторов на концах валов вариаторов частоты.

В дальнейшем на концы валов вариаторов дополнительно были установлены сплошные диски с ответными статорными дисками, что позволило уменьшить напряжение на валах вариаторов.

В пятой главе описана осуществленная на синхроциклотроне 1 ГэВ система увеличения длительности (временная растяжка) пучка протонов на 1 ГэВ [11 – 13].

В синхроциклотронах ускорение протонов осуществляется сгустками, величина которых определяется условиями их захвата в режим ускорения. Короткий пучок выведенных протонов длительностью $\sim 10^{-4}$ с является очень неудобным для физических исследований, особенно с применением электронной методики, поэтому возникает проблема растяжки пучка во времени, т.е. создание специальной системы медленного доускорения и соответственно медленного растянутого вывода пучка в течение всего обратного хода частоты, а в необходимых случаях даже больше. Методы увеличения длительности пучка в синхроциклотроне достаточно подробно рассмотрены в работе⁵. Для медленного доускорения обычно используется независимая дополнительная ускоряющая система с помощью отдельного так называемого Си-электрода, это две пластины С-образной формы, электрически соединенные между собой, расположенные выше и ниже средней плоскости ускорения частиц, на которые подается высокочастотное напряжение, когда основная высокочастотная программа выключена. Поскольку во всех существующих системах включение каждого цикла медленного ускорения после выключения основной программы происходит с произвольной фазой относительно циркулирующего сгустка пучка, то переход из одного режима ускорения в другой связан с неизбежными потерями пучка, достигающими 50%.

Следует отметить, что Си-электрод может быть использован и для быстрого вертикального сброса протонов на мишень, расположенную выше или ниже средней плоскости, на конечном радиусе ускорения, при подаче импульса напряжения ~ 100 кВ между этими электродами^{6,7}, что позволяет получить нейтронные пучки разных энергий.

⁵ Л.М.Онищенко. "Возможные способы увеличения длительности пучка в синхроциклотроне". 1974 г., ОИЯИ, Р9-7836, Дубна.

⁶ G.H.Stafford at all. RSI, 1957, v. 28, 10, p. 749.

⁷ I.Rainwater at all. RSI, 1964, v. 35, 3, p. 263.

Однако режимы эти не могут быть осуществлены независимо, т.к. требуются соответствующие переключения (в режиме вертикального сброса пучка пластины должны быть электрически изолированы).

Проблема осложняется еще и тем, что для установки второй пары электродов, чтобы эти режимы были независимы, нет места (их протяженность $\sim 60^\circ$).

Для синхроциклотрона ПИЯФ РАН с энергией выведенных протонов 1 ГэВ была разработана и реализована совмещенная система для увеличения длительности макроимпульса внешнего пучка и быстрого однооборотного сброса на внутреннюю мишень. Совмещенность систем достигается за счет конструкции Си-электрода и системы его питания, что обеспечивает возможность одновременной работы при любой последовательности чередования этих режимов [12, 13].

Отличительной особенностью растяжки является сравнительно высокая эффективность захвата пучка в режим ускорения Си-электродом при достаточно высоком коэффициенте использования цикла, достигнутая за счет частотной и фазовой синхронизации между основной ускоряющей системой и генератором Си-электрода, а также введением коррекции фазы напряжения на Си-электроде относительно положения сгустка протонов [14]. Получена практически прямоугольная форма макроимпульса растянутого пучка за счет выбора оптимальной частотной программы Си-системы. В системе использован узкополосный резонансный синхронно перестраиваемый по частоте генератор для ускорения в диапазоне частот 13,3 МГц, что позволило значительно (\sim в 100 раз) снизить мощность в.ч. генератора по сравнению с существующими на других синхроциклотронах Си-системами.

Для обеспечения возможности совместной работы Си-электрода в качестве ускоряющего электрода при растяжке пучка и одновременно в качестве отклоняющего дефлектора при сбросе пучка конструкция Си-электрода выполнена в виде двух отдельных медных пластин. Угловая протяженность пластин составляет 60° , ширина – 250 мм, установлены они на радиусе, равном 3070 мм.

Каждая из пластин крепится к боковой стенке камеры при помощи трех штоков-держателей. Центральные штоки одновременно являются вводами напряжения к Си-электроду. Боковые штоки отделены от пластин керамическими изоляторами. Конструкция крепления Си-электрода позволяет регулировать радиальное и вертикальное положения пластин без нарушения вакуума в камере. Возможное перемещение пластин в радиальном направлении составляет 40 см, а расстояние между пластинами может изменяться от 6 см до 18 см. Регулирующие элементы снабжены указателями положения пластин.

Конструкция изоляторов Си-электрода обеспечивает работу системы в режиме дефлектора при импульсном напряжении на пластинах до 100 кВ. На центральных опорах применены полые керамические изоляторы. С целью

предотвращения разрушения вакуумных уплотнений коронным разрядом полости изоляторов заполняются инертным газом.

Пластины Си-электрода связаны с анодом выходного каскада в.ч. генератора системы растяжки при помощи двух фидерных линий, выполненных из кабелей типа РКГ-15. С целью удаления аппаратуры от радиоактивной зоны и облегчения её экранировки от магнитного поля ускорителя длина фидеров выбрана 12,5 м, что соответствует на частоте вывода пучка $f_k = 13,4$ МГц возбуждению моды колебаний $4 \times \lambda / 4$.

Перестройка резонансной частоты осуществляется переменной индуктивностью с ферритовым сердечником (8). Одновременно пластины Си-электрода используются в качестве импульсного дефлектора для однооборотного сброса пучка. Источником импульсного напряжения является тиратронный генератор с выходным ферритовым трансформатором. Выходная обмотка трансформатора, состоящая из центральных жил фидеров, выполнена таким образом, что система обеспечивает синфазную подачу ускоряющего напряжения на пластины в режиме растяжки и противофазную подачу импульсного напряжения в режиме сброса. Таким образом, достигается отсутствие связи между импульсным и в.ч. генераторами.

Принцип работы ускорителя в режиме растяжки поясняется рис. 13, на котором показаны: f_d – частотная программа основной ускоряющей системы синхроциклотрона, f_c – частотная программа Си-электрода, U – модулирующее напряжение для управления частотой генератора Си-электрода. Основная частотная программа прерывается с помощью анодного манипулятора (пунктирная кривая). Обе частотные программы сфазированы между собой в области захвата пучка в режим ускорения Си-электродом. При сближении частот основной программы f_d и начальной частоты Си-электрода f_1 в момент времени t_1 происходит захват частоты генератора Си-электрода частотой основного генератора, и в течение интервала времени $t_1 \div t_2$ оба генератора работают синфазно. В момент времени t_2 , когда частота основной программы достигает значения f_k , соответствующего оптимальному радиальному положению пучка относительно Си-электрода, отключается напряжение с основного генератора и включается каскад формирования пилообразного тока, управляющего частотой генератора Си-электрода. Интервал $t_2 \div t_3$ и форму зависимости $f_c(t)$ можно произвольно менять в широких пределах. Низшая частота генератора f_3 соответствует концу вывода пучка (13,3 МГц). Полная девиация в области $t_2 \div t_3$ – 250 кГц.

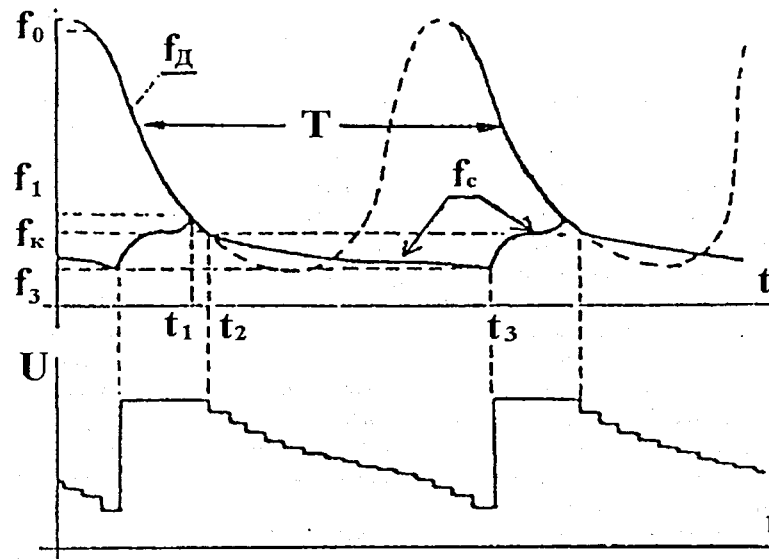


Рис. 13. Частотная программа: f_d – основная, f_c – Си-электрода, U – форма напряжения, задающего частотную программу Си-электрода

После выключения основной программы генератор Си-электрода будет работать на частоте, определяемой собственной частотой его колебательного контура и влиянием реактивности, вносимой циркулирующим пучком протонов. Это может привести к фазовым потерям пучка в момент отключения генератора дуанта, раскачке радиально-фазовых колебаний, дополнительным потерям пучка и нестабильности интенсивности в процессе временной растяжки.

Для предотвращения этого введена фазовая коррекция частоты генератора Си-электрода непосредственно по азимутальному положению сгустка частиц. Такая коррекция осуществляется путем выделения в.ч. сигнала взаимодействия сгустка частиц с резонансным контуром Си-электрода и подачи его на задающий генератор Си-электрода. Оптимальная фаза корректирующего сигнала подбирается при помощи регулируемого фазовращателя.

В течение интервала времени $t_1 \div t_2$ оба генератора работают синфазно. В момент времени t_2 , когда частота основной программы достигает значения f_k , соответствующего оптимальному радиальному положению пучка относительно Си-электрода, отключается напряжение с основного в.ч. генератора и включается программа, формирующая закон изменения частоты Си-электрода с автоподстройкой фазы относительно фазы сгустка частиц.

Переход пучка от ускорения дуантом к ускорению Си-электродом происходит со 100 - процентной эффективностью. Наблюдался незначительный экспоненциальный спад интенсивности с ростом коэффициента временного заполнения, который, возможно, связан с потерями пучка из-за неоднородностей магнитного поля вблизи регенеративной выводной системы ускорителя. Максимальный коэффициент временного заполнения $45 \div 50\%$ ограничивается значением отношения нерабочей части программы к периоду модуляции из-за влияния следующего цикла основной программы на режим ускорения Си-электродом при частоте основной программы, близкой к удвоенной частоте вывода. В режиме с пропуском циклов ускорения коэффициент временного заполнения может быть значительно увеличен. Работа системы растяжки без фазировки ее с циркулирующим пучком приводит к уменьшению средней интенсивности на $10 \div 15\%$ при одновременном значительном ухудшении стабильности интенсивности от цикла к циклу. Зависимость интенсивности растянутого пучка от величины относительного сдвига фаз между сгустком пучка и в.ч. напряжением на Си-электроде при различных амплитудах в.ч. напряжения приведена на рис. 14.

На осциллограмме, рис.15, показаны (сверху-вниз): огибающая в.ч. напряжения основной программы синхроциклотрона; форма тока для частотной модуляции Си-системы; выведенный пучок синхроциклотрона – сигнал с ФЭУ, расположенного в главном зале ускорителя, пик в конце в.ч. программы соответствует фону от рассеяния пучка на элементах выводной системы.

Временной масштаб осциллограмм соответствует 3 мс/деление.

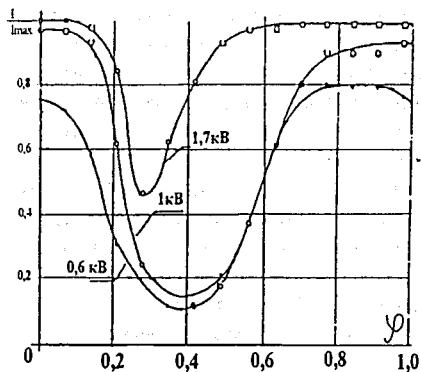


Рис. 14.

Зависимость интенсивности растянутого пучка от синхронизации с основной программой ускорения

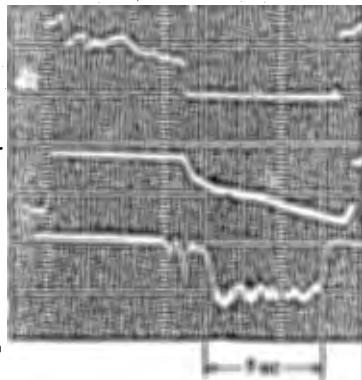


Рис. 15.

Осциллограммы: (сверху вниз) огибающей в.ч. напряжения на дуанте, тока управления частотой модуляции макроимпульса растянутого пучка

В главе 6 рассмотрена работа Си-электрода в режиме вертикального сброса протонов на мишень.

Как отмечалось выше, сброс протонного пучка на свинцовую мишень осуществляется в результате возбуждения свободных вертикальных колебаний протонного пучка импульсом высокого напряжения (70-90 кВ) с длительностью переднего фронта 70 нс.

Высоковольтный импульс сброса вырабатывается тиратронным генератором, запуск которого синхронизирован с фазой высокочастотного ускоряющего напряжения. Соответствующим выбором момента подачи запускающего импульса достигаются условия прохождения протонного сгустка между отклоняющими пластинами в момент, когда напряжение достигает максимальной величины. Через один оборот (~ 77 нс) отклоненный протонный пучок попадает на свинцовую мишень, верхний край которой расположен на 2 – 3 см ниже медианной поверхности магнитного поля ускорителя. Соответствующим пересчетом импульсов запуска может быть легко осуществлен режим "разделения времени", когда будет сбрасываться любой протонный сгусток. Испытания нейтронного источника проводились при помощи регистрации γ -квантов, возникающих при взаимодействии протонов с мишенью, тонким пластическим сцинтиллятором. Временные распределения импульсов γ -квантов относительно стартового запускающего импульса представлены на рис. 16. В зависимости от фазы, напряжения и положения мишени могут быть достигнуты условия сброса протонного пучка за один, два или более оборотов. В условиях оптимального сброса ширина распределения на полувысоте составляет 7 – 10 нс в соответствии с временной длительностью протонного сгустка. Эта величина определяет предельно достижимое разрешение нейтронного спектрометра по времени полета.

При токе протонного пучка 1 мкА и частоте 50 Гц интенсивность нейтронного источника составила $\sim 10^{14}$ нейтр/с. Построенный на базе этого источника нейтронный спектрометр по времени полета «ГНЕЙС» использовался для исследований в области физики деления и для изучения n, γ -реакций [15 – 17]. По своим параметрам спектрометр «ГНЕЙС» является одним из лучших приборов этого типа в нашей стране и за рубежом. На рис. 17 показаны для сравнения величины потоков нейтронов при стандартном фиксированном энергетическом разрешении $\Delta E/E = 8,8 \cdot 10^{-4}$ для различных времяпролетных спектрометров⁸. Помимо спектрометра «ГНЕЙС» приведены данные для реактора ИБР-30 в бустерном режиме с ЛУЭ-40 (ОИЯИ), GELINA (ЛУЭ, Бельгия), ORELA (ЛУЭ, США) HSC (синхроциклотрон, Харуэлл, Великобритания) и WNR (линейный ускоритель протонов, США).

⁸ Н.К. Абросимов, Г.А. Петров и др. «Нейтронный спектрометр ГНЕЙС». Сборник «Методические и прикладные работы ПИЯФ» 1988 г., Гатчина стр.180.

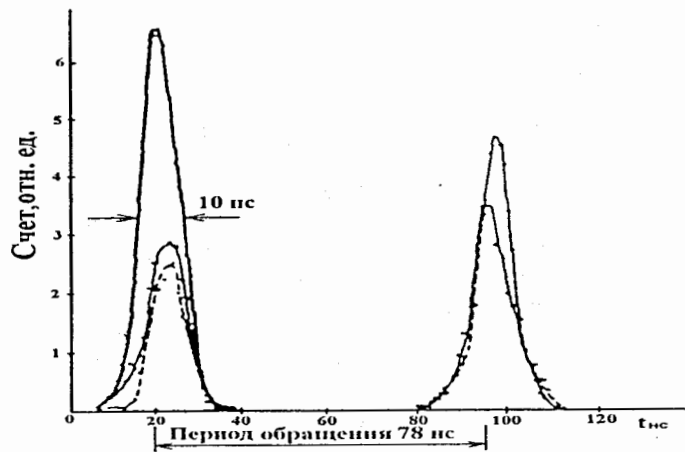


Рис. 16. Временное распределение γ -квантов из мишени нейтронного источника при вертикальном сбросе протонов

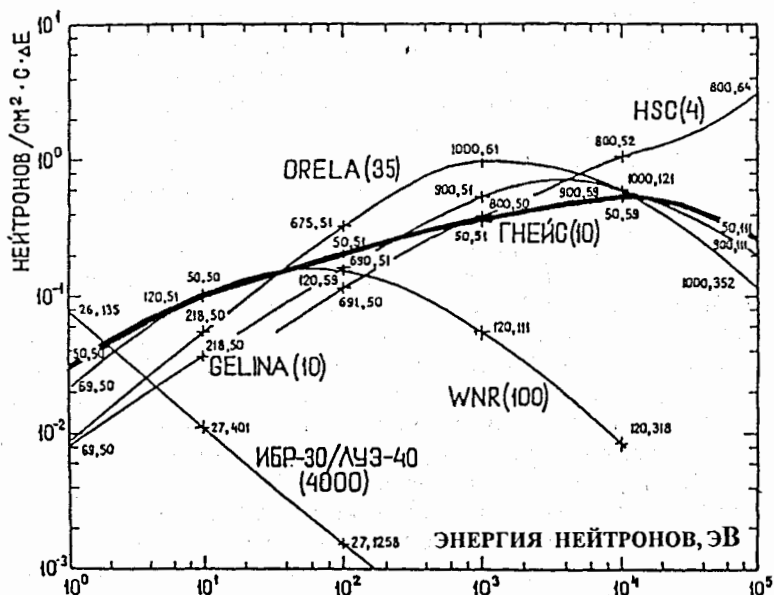


Рис. 17. Времяпролетные спектрометры: потоки нейтронов при фиксированном энергетическом разрешении. Длительность всплески быстрых нейтронов (нс) – в скобках рядом с названием установки, числа на кривых – частота следования (Гц) и длина пролетной базы (м)

Заключенне содержит основные результаты диссертационной работы:

1. Внесены существенные конструктивные изменения в проектную схему вариатора частоты, что позволило осуществить возможность оперативной регулировки границ частотного диапазона и очистить рабочий диапазон от паразитных контуров. Изменение формы дуантного и индуктивных пакетов максимально приблизило к оптимальной зависимость частотной программы от угла поворота ротора.

Вместо предусмотренной проектом системы связи высокочастотного генератора с резонансной системой синхротрона была разработана и осуществлена симметричная система прямой и обратной связи, обеспечившая надежное возбуждение в.ч. колебаний в рабочем диапазоне с подавлением поперечных колебаний системы и незначительные изменения от частоты коэффициента трансформации напряжения от анода генераторной лампы к ускоряющей щели дуанта.

Все это вместе обеспечило получение практически предельной энергии 1 ГэВ и приемлемого, порядка 1 мкА, тока внутреннего протонного пучка (авт. свидетельство № 270131, 1970 г.).

2. Впервые предложена система частотной и фазовой синхронизации высокочастотного генератора растяжки с основным генератором, что обеспечило 100-процентную эффективность перехода протонов из основного режима ускорения в режим временной растяжки пучка при относительно низком в.ч. напряжении на Си-электроде (~ 2 кВ), что дало возможность резко снизить мощность генератора Си-электрода.

3. Осуществление синхронизации генератора Си-электрода относительно фазы густка ускоренного пучка протонов позволило стабилизировать распределение протонов по времени вывода от цикла к циклу и получить путем выделения временного интервала в выведенном пучке повышение его монохроматичности в заданном интервале времени до 0,3 МэВ (авт. свидетельство № 370901, 1972 г.).

4. Впервые предложена и выполнена совмещенная система временной растяжки пучка с однооборотным вертикальным сбросом пучка на мишень при возможности их независимой и одновременной работы, что позволило существенно повысить эффективность использования ускорителя и создать нейтронно-пролетный спектрометр «ГНЕЙС» с параметрами, не уступающими лучшим мировым приборам этого типа (авт. свидетельство № 497934, 1975 г.).

Таким образом, впервые был разработан, создан и реально применен на синхротроне ПИЯФ РАН высокочастотный ускорительный комплекс, обеспечивший получение энергии ускоренных протонов 1 ГэВ, позволивший исключить потери ускоряемых частиц при их переходе в режим временной растяжки, обеспечить равномерное распределение по времени выведенных протонов, улучшить стабильность энергетического спектра выведенного пучка и повысить эффективность использования ускорителя созданием совмещенной с вертикальным сбросом на мишень системы временной растяжки с помощью Си-электродов.

Основные результаты диссертации представлены в библиографическом сборнике [18] и опубликованы в работах:

1. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Ленинградский синхротрон на энергию протонов 1 ГэВ. ЖТФ, 1971, т.41, в.9, с.1769-1775.
2. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Основные характеристики высокочастотной системы синхротрона ФТИ АН СССР. ЖТФ, 1971г., т.41, в.6, с.1222-1230.
3. *Н.К. Абросимов, В.А. Елисеев, Н.Н. Чернов и др.* Магнитное поле синхротрона. ФТИ им. А.Ф.Иоффе. ЖТФ, 1971, т.XLI, в.9, стр.1781.
4. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Синхротрон ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 ГэВ. Труды VII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Ереван, 1969. М., 1970, т.1, с. 317-323.
5. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Высокочастотная система синхротрона ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 ГэВ. Труды VII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Ереван, М., 1970, т.1, с.349-355.
6. *N. Chernov.* The status report of LNPI 1 GeV synchrocyclotron. Particle Accelerator Conference, San-Francisco, USA. IEEE transaction on Nuclear Science, 1973, Vol. NS-20, p. 263-265.
7. *Н.К. Абросимов, В.А. Волченков, В.А. Елисеев, Г.А. Рябов, Н.Н. Чернов.* Эффективный вывод протонного пучка синхротрона на 1 ГэВ. ЖТФ, 1970 г., т.40, стр. 2593.
8. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Синхротрон ЛИЯФ на энергию протонов 1 ГэВ. // Методические и прикладные работы ЛИЯФ. Л., 1988, с.171-173.
9. *Н.К. Abrosimov, S.P. Dmitriev, V.A. Eliseev, G.F. Mikheev, G.A. Riabov, N.N. Chernov.* History and Present Status of PNPI Synchrocyclotron. PNPI XXV. Main scientific activities 1971-1996. High Energy Physics. Gatchina, 1988, p.6-17.
10. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Устройство связи генераторной лампы с резонансной системой синхротрона. Авторское

свид. № 270131 с приоритетом 28.04.1969. Бюллетень изобретений № 16, 1970, с.62.

11. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхротрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ, № 1, Гатчина, 1972, 22 стр.
12. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Совмещенная система для увеличения длительности и быстрого сброса протонного пучка синхротрона. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 2-4 октября, М., 1973, т. II, с.94-98.
13. *А.В. Куликов, Н.Н. Чернов.* Устройство для растяжки во времени пучка синхротрона. Авторское свид. № 370901 с приоритетом от 20 июля 1972 г.
14. *Н.К. Абросимов, А.В. Куликов, Г.Ф. Михеев, Н.Н. Чернов.* Способ уменьшения потерь части в синхротроне при использовании временной растяжки пучка с помощью С-электрода. Авторское свид. № 497934 с приоритетом от 3.01.1974 г.
15. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Нейтронный спектрометр по времени пролета на базе синхротрона ЛИЯФ им. Б.П.Константинова АН СССР. Нейтронная физика (Материалы III Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Киев, 9-13 июня 1975г.), М., ЦНИИ атоминформ, 1976, т.6, с. 221-226.
16. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Гатчинский нейтронный спектрометр на базе синхротрона ФТИ («ГНЕЙС»). Материалы Всесоюзного совещания. Нейтронная физика, Киев: Наукова думка, 1972г., ч. II, с.188.
17. *Н.К. Абросимов, ... Н.Н. Чернов и др.* Система временной растяжки пучка синхротрона ЛИЯФ АН СССР. // Методические и прикладные работы ЛИЯФ. Л., 1988, с.177-179.
18. Синхротрон на энергию протонов 1 ГэВ ПИЯФ РАН. Информационные материалы. Библиография. Гатчина, 2000, ПИЯФ им. Б.П.Константинова РАН, стр.66.