

## СИНХРОЦИКЛОТРОН ФТИ АН СССР НА ЭНЕРГИЮ ПРОТОНОВ 1 ГЭВ

Н. К. АБРОСИМОВ, Д. Г. АЛХАЗОВ, С. П. ДМИТРИЕВ, В. А. ЕЛИСЕЕВ,  
Д. М. КАМИНКЕР, А. А. КУЛИКОВ, Г. А. РЯБОВ, Н. Н. ЧЕРНОВ

*Физико-Технический институт им. А. Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград*

И. В. ГУСЕВ, Е. Г. КОМАР, И. Ф. МАЛЫШЕВ, Н. А. МОНОСЗОН,  
В. И. ПЕРЕГУД, Б. В. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ, И. М. РОЙФЕ,  
Е. В. СЕРЕДЕНКО, А. Т. ЧЕСНОКОВ

*Научно-исследовательский институт электрофизической  
аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Ленинград*

*Докладчик: Н. К. Абросимов*

В ноябре 1967 года состоялся пробный запуск синхроциклотрона ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 Гэв. В связи с возникшими трудностями, связанными с возбуждением резонансной системы синхроциклотрона в диапазоне частот, необходимом для ускорения протонов до энергии 1 Гэв, получить проектную энергию при этом не удалось. В камере ускорителя были получены протоны с энергией 750 Мэв.

В 1968 году энергия протонов была доведена до 1 Гэв при токе внутри камеры 0,5 мка.

### 1. Основные параметры ускорителя

Основные параметры ускорителя приведены в таблице 1.

*Таблица 1*

Энергия ускоряемых протонов	— 1 Гэв
Диаметр полюса магнита	— 6850 мм
Зазор между полюсами	— 500 мм
Магнитное поле в центре	— 19 кгс
Магнитное поле на выводном радиусе.	— 17,86 кгс
Выводной радиус	— 3165 мм
Рабочий диапазон частот высокочастотной системы	— 28,88—13,18 мгц
Ускоряющее напряжение	— до 15 кв.
Частота повторения	— 50—100 гц.
Мощность ВЧ-генератора	— 400 квт.

План здания ускорителя представлен на рис. 1. Ускоритель размещается в круглом зале диаметром 32 м. Непосредственно к залу ускорителя примыкает экспериментальный зал, выполненный в виде полукольца шириной 23 м и площадью 2500 кв.м. Этот зал отделен от зала ускорителя защитной стеной из тяжелого бетона (удельный вес 3,6 т/куб. м.) толщиной 8 м, в которой имеется широкая амбразура, где помещаются коллиматоры и магнитные линзы трактов пучков. Остальное пространство амбразуры заполнено защитными чугунными блоками. Толщина чугунной защиты — 4 м.

В экспериментальном зале располагается аппаратура для физических исследований, управление которой осуществляется дистанционно из двух измерительных залов, отделенных от экспериментального зала защитной бетонной стеной толщиной 4 м. К наружной стене экспериментального зала примыкает двухэтажная пристройка, в которой размещается обслуживающий персонал и имеются подготовительные лабораторные помещения для физиков.

Энергетическое оборудование ускорителя и пульт управления размещаются в соседнем здании, соединенном с основным зданием ускорителя кабельным туннелем.

## 2. Магнит

Основу электромагнита синхроциклотрона составляет его ярмо, выполненное из листовой конструкционной стали толщиной 30 мм. Листы собраны в пакеты, стягиваемые между собой шпильками. Вес каждого пакета не превышает 100 т. Сердечник собран из полудисков толщиной 300 мм. Полюсные наконечники одновременно являются крышками вакуумной камеры. Вес магнитопровода магнита составляет около 7 тыс. тонн.

Внешние габариты:  $16,5 \times 7,8 \times 10$  м<sup>3</sup>.

Основная обмотка имеет 264 витка и намотана из алюминиевой шины квадратного сечения размером  $86 \times 86$  мм<sup>2</sup>, имеющей внутреннее отверстие диаметром 30 мм, по которому протекает вода для охлаждения обмотки. Номинальный ток основной обмотки—4600 а.

Для симметрирования распределения магнитодвижущей силы по магнитопроводу магнита используется дополнительная обмотка, ампервитки которой составляют 2% от ампервитков основной обмотки.

Магнитное поле внутри зазора сформировано с помощью кольцевых шимм. Для увеличения показателя спада магнитного поля в центре машины используются два цилиндра диаметром 78 мм и высотой 55 мм.

Измерение распределения магнитного поля производилось с помощью ядерного магнитометра с точностью  $3 \times 10^{-5}$ ; положение медианной поверхности магнитного поля по отношению к средней плоскости зазора определялось с помощью датчика Холла, подвешенного на тонкой

нити, с точностью 0,5 см. Магнитные датчики устанавливались на автоматизированную координатную систему, позволяющую помещать каретку с датчиками в заданную точку зазора с точностью: по радиусу и вертикали—0,1 мм, по азимуту—0,1°. Процесс измерений был автоматизирован. Результаты измерений и координаты точек записывались на ленту и затем обрабатывались на ЭВМ.

Точность шиммирования соответствовала получению амплитуд вынужденных радиальных и вертикальных колебаний не более 1 см. Среднее положение медианной поверхности относительно средней плоскости зазора отличается также на величину не превышающую 1 см.

Для обеспечения в будущем возможности ускорения поляризованных протонов на ряде значений радиусов, соответствующих резонансной деполяризации за счет неоднородностей магнитного поля, было проведено дополнительное шиммирование. Точность шиммирования соответствует суммарной деполяризации ускоряемого поляризованного пучка не более 3%.

Результаты шиммирования были проверены при наличии вакуума в ускорительной камере. Деформация крышек камеры за счет действия атмосферного давления не сказалась на основные результаты.

На рис. 2 представлены основные параметры магнитного поля в зависимости от радиуса.

### 3. Высокочастотная система

В синхроциклотроне ФТИ АН СССР использована полуволновая резонансная система с двумя вращающимися вариаторами частоты, подключенными своими статорными пакетами непосредственно к задней части дуанта. Общий вид системы представлен на рис. 3.

Ширина подключения вариаторов составляет лишь часть ширины задней части дуанта, что при выбранной конфигурации системы дуант-камера и вариатора обеспечивает получение рабочего диапазона частот (29,5—13 мгц). Диапазон изменения емкостей вариаторов соответственно 180—7400 пкф.

Для получения достаточно большой эквивалентной емкости вариаторов в низкочастотной части диапазона каждый из них имеет по две группы дополнительных статорных пакетов, подключенных к задней части дуанта через специальные индуктивности, образующие последовательные LC-цепочки, резонансные частоты которых находятся несколько выше частоты основной программы. Для получения достаточно малой эквивалентной емкости в высокочастотной части диапазона к вариаторам подключены параллельные индуктивности.

Ротор каждого вариатора заземлен по высокой частоте через емкость, образованную пластинами ротора и «земляными» статорными пакетами, а также через полицилиндрические конденсаторы, расположенные на концах вала. Конструктивно ротор выполнен в виде полого, охлаждаемого водой вала, на который насажено 17 шестилопастных

дисков. Скорость вращения ротора может достигать до 3000 об/мин. Для уменьшения нагрева ротора за счет вихревых токов при вращении его в рассеянном поле магнита вариатор помещен в экранирующий стальной кожух.

Высокочастотный генератор собран на двух лампах ГК-5А, включенных параллельно по схеме с заземленной сеткой. Мощность генератора 400 квт. Имеется анодный модулятор, выключающий анодное напряжение на время обратного хода частотной программы.

Система связи генератора с резонансной системой симметричная и состоит из двух коаксиальных фидеров прямой связи, связывающих аноды генераторных ламп с задней частью дуанта в местах подключения вариаторов, и разветвленного Т-образного фидера обратной связи, связывающего катоды генераторных ламп с индуктивными элементами вариаторов. Система связи обеспечивает постоянство ускоряющего напряжения в пределах 25%.

Частотная программа представлена на рис. 4.

#### 4. Ускорительная камера и вакуумная система

Вакуумная камера синхротрона объемом около 35 м<sup>3</sup> образована ускорительной камерой и откатным отсеком, внутри которого закреплен дуант, а на задней стенке установлены вариаторы частоты.

Ускорительная камера выполнена из двух, охватывающих полдосные наконечники, восьмиугольных стальных листов, между которыми установлены съемные стальные стойки и стенки из алюминиевого сплава. Откатной отсек и примыкающая к нему половина ускорительной камеры плакированы изнутри охлаждаемой оболочкой из листовой меди. Дуант установлен на двух охлаждаемых воздухом пустотелых керамических изоляторах, размещенных в его средней части, где высокочастотное напряжение в течение всего цикла ускорения остается сравнительно невысоким.

Задняя часть дуанта поддерживается металлической опорой, выполненной в виде медненной спиральной пружины, охлаждаемой водой. Охлаждающая вода подается к дунту через специальный дроссель, выполненный из медных трубок. Заземленный антидуанг отсутствует.

Давление в камере в режиме ускорения  $(3-5) \times 10^{-6}$  тор обеспечивается паромасляными вакуумными агрегатами с суммарной скоростью откачки 36000 л/сек. (2 агрегата типа ВА-40.2 и 4 агрегата ВА-8-4). Ловушки вакуумных агрегатов охлаждаются жидким азотом, который подается из танка емкостью 6 м<sup>3</sup> по азотопроводу с вакуумной изоляцией. Форвакуумная откачка обеспечивается 7-ю форвакуумными насосами ВН-7Г.

## 5. Ионный источник

В синхроциклотроне ФТИ использован открытый ионный источник с высокочастотным разрядом, аналогичный по конструкции ионному источнику, работающему на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ.

## 6. Система вывода пучка

Для вывода пучка из синхроциклотрона применена нелинейная регенеративная система, разработанная в Физико-техническом институте. Расчет системы выполнен с учетом спектра бетатронных колебаний, существующего в машине. Магнитный канал состоит из 5 секций и вместе со спадающим полем синхроциклотрона представляет собой оптическую систему со знако-переменной фокусировкой. Отличительной особенностью регенератора и канала является сравнительно большие апертуры. Полученная в настоящий момент эффективность вывода  $\sim 25\%$ .

Интенсивность выведенного пучка:  $(6-5) \times 10^{11} \frac{\text{част.}}{\text{сек}}$ .

## ДИСКУССИЯ

**Kim** 1. Do you have fast as well as slow extraction method, and what kind of extraction method do you use?

2. You have a quite high extraction efficiency (25%) and a small amplitude of betatron oscillation (1 cm), could you comment on central region of your machine, in order to have such a small betatron amplitude?

**Абросимов:** 1. Мы используем нелинейную регенеративную систему вывода. Длительность выведенного пучка 150 мкс при частоте повторения 5 $\mu$  гц.

2. Амплитуды вынужденных бетатронных колебаний, определяемые неоднородностями поля  $\sim 1$  см. Амплитуды свободных радиальных бетатронных колебаний—до 10 см. Высокая эффективность вывода получена за счет учета реального спектра амплитуд бетатронных колебаний, расширения апертур регенаратора и магнитного канала, а также за счет тщательного шиммирования всего магнитного канала в целом.

**Басаргин:** Какая предполагается интенсивность пучка протонов при увеличении ускоряющего напряжения до 15 кв?

**Абросимов:** В ближайшее время мы предполагаем получить интенсивность внутреннего пучка порядка 1 мка или несколько выше.

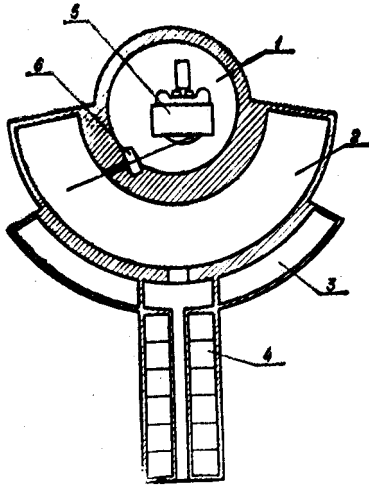


Рис. 1. План здания ускорителя. 1—зал ускорителя, 2—экспериментальный зал, 3—измерительные залы, 4—лабораторная пристройка, 5—синхроциклотрон, 6—магнит для коммутации протонного пучка.

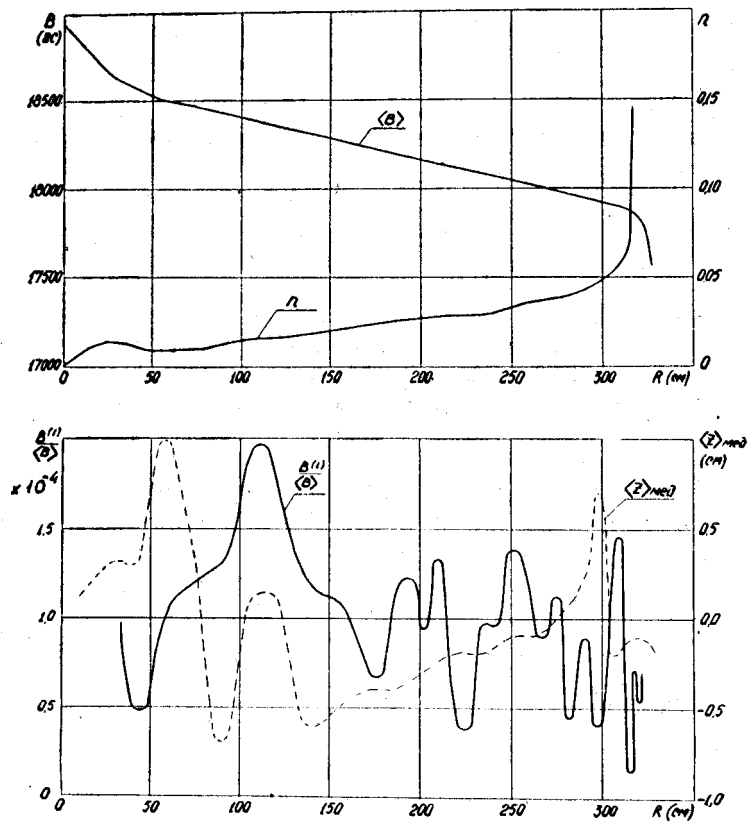


Рис. 2. Основные параметры магнитного поля в зависимости от радиуса.  $\langle B \rangle$  — средняя по азимуту величина магнитного поля,  $n = -\frac{R}{\langle B \rangle} \frac{d\langle B \rangle}{dR}$ ,  $B^{(1)}$  — первая гармоника вертикальной составляющей поля,  $\langle z \rangle_{med}$  — среднее по азимуту отклонение медианной поверхности от средней плоскости зазора.

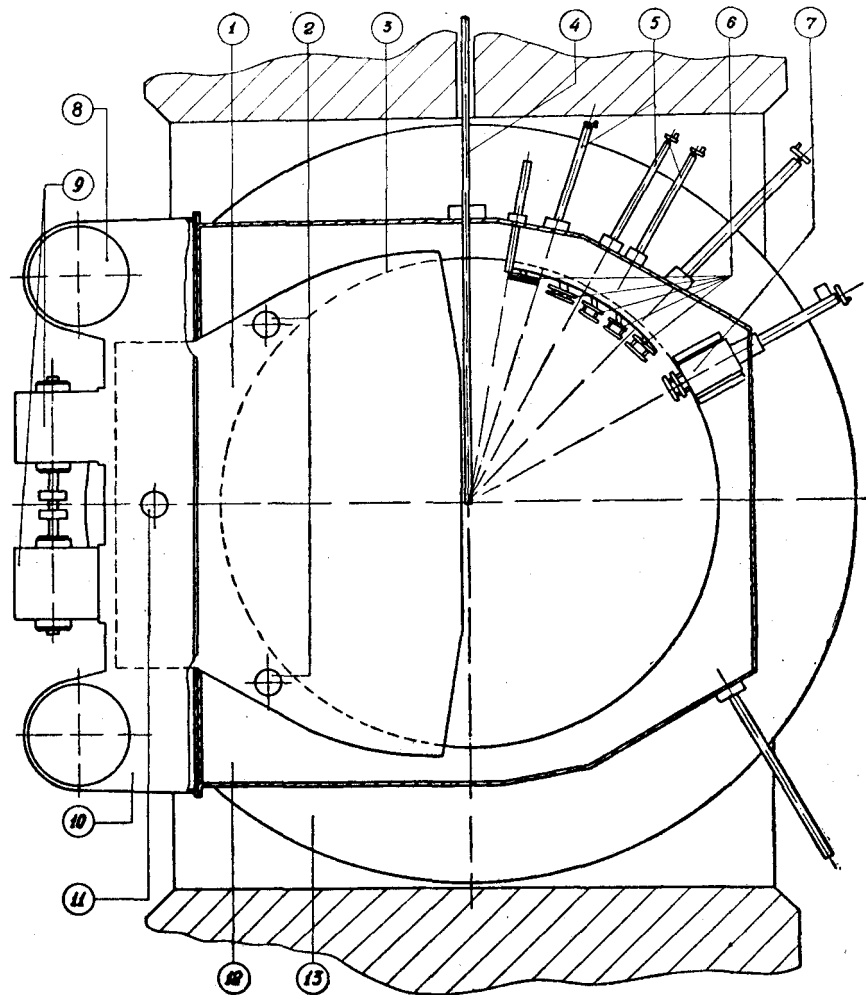


Рис. 3. Общий вид ускорительной камеры. 1—дуант, 2—керамические опоры дуанта, 3—полюс магнита, 4—ионный источник, 5—пробники, 6—магнитный канал, 7—регенератор, 8—вакуумные насосы, 9—вариаторы, 10—отсек вакуумной камеры, 11—пружинная опора дуанта, 12—вакуумная камера, 13—обмотка электромагнита.

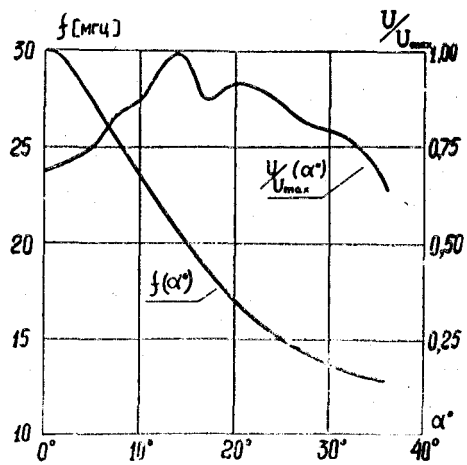


Рис. 4. Основные параметры высокочастотной системы в зависимости от угла поворота ротора вариатора.  $f(\alpha^\circ)$ —частотная программа,  $U(\alpha^\circ)$ —ускоряющее напряжение.