

Некоторые итоги комплексной наладки и пуска протонного синхротрона ИФВЭ на энергию 70 Гэв

Ю. М. АДО, А. А. ЖУРАВЛЕВ, А. А. ЛОГУНОВ, Э. А. МЯЭ, А. А. НАУМОВ, В. Е. ПИСАРЕВСКИЙ, В. Г. РОГОЗИНСКИЙ, К. З. ТУШАБРАМИШВИЛИ, П. А. ШУКЕЙЛО, С. Н. БОЙКО, Е. Г. КОМАР, И. Ф. МАЛЫШЕВ, И. В. МОЗИН, Н. А. МОНОСОН, И. А. МОЗАЛЕВСКИЙ, Ф. М. СПЕАКОВА, А. М. СТОЛОВ, В. А. ТИТОВ, Ф. А. ВОДОПЬЯНОВ, А. А. КУЗЬМИН, В. Ф. КУЗЬМИН, А. Л. МИНЦ, С. М. РУБЧИНСКИЙ, В. А. УВАРОВ, Б. М. ГУТНЕР, В. Б. ЗАЛМАНЗОН, А. И. ПРОКОПЬЕВ, А. С. ТЕМКИН

УДК 621.384.634

Протонный синхротрон на энергию 70 Гэв сооружен на основе проекта, разработанного рядом научно-исследовательских и проектных организаций.

Физическая часть проекта выполнена Институтом теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ). Электромагнит с системой питания, вакуумная камера, устройства ввода разработаны в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова. Радиоэлектронные системы управления процессом ускорения и генерирования ускоряющего поля, а также системы радиотехнических измерений и наблюдения за пучком разработаны Радиотехническим институтом АН СССР. Государственный проектный институт «Тяжпромэлектропроект» спроектировал электротехнические устройства общего назначения и кабельные соединения. Проект строительного комплекса ускорителя разработан Государственным союзным проектным институтом.

Общее руководство сооружением ускорителя осуществлял Государственный комитет по использованию атомной энергии СССР. Наладку отдельных систем, комплексную наладку и пуск ускорителя выполнили Институт физики высоких энергий (ИФВЭ) и разработчики систем ускорителя. Основные работы с пучком проводил ИФВЭ при участии Радиотехнического института.

Сооружение ускорителя было начато в 1960 г., в начале 1967 г. все основные строительные и монтажные работы были закончены *. 28 июля 1967 г. был запущен линейный ускоритель-инжектор, к сентябрю 1967 г. налажена работа отдельных систем и 14 октября осуществлен физический пуск ускорителя.

Основные параметры протонного синхротрона ИФВЭ [1—4] следующие:

Число блоков электромагнита	120
Число суперпериодов в магнитной структуре	12

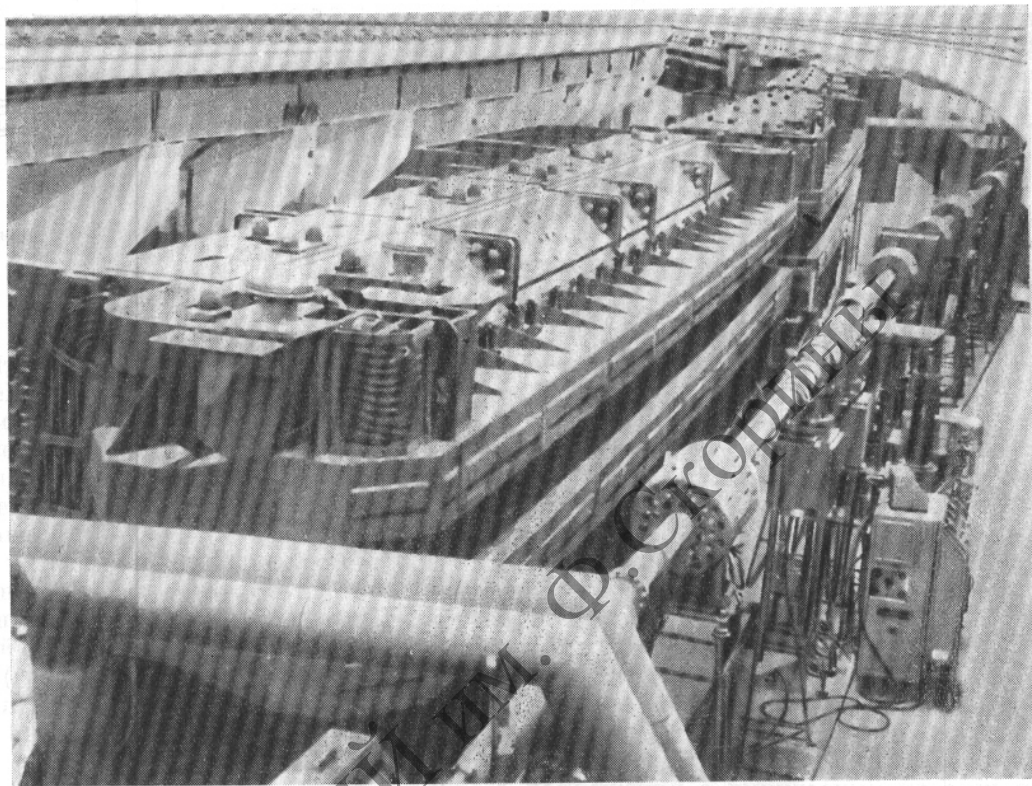
* На начальной стадии сооружения ускорителя, до образования ИФВЭ в 1963 г., координацию работ выполнял ИТЭФ.

Структура элемента периодичности	ФОДО
Длина равновесной орбиты	1483,7 м
Радиус кривизны орбиты в блоке	194,1 м
Средний радиус орбиты	236,2 м
Длина блока по железу:	
нормального	10,42 м
короткого	9,30 м
Длина прямолинейного промежутка:	
длинного	4,87 м
среднего	2,62 м
короткого	1,27 м
Расстояние до асимптоты гиперболы в блоке	43,8 см
Число бетатронных колебаний на оборот:	
по радиусу	9,72
по высоте	9,65
Рабочая область вакуумной камеры:	
по радиусу	17 см
по высоте	11,5 см
Энергия инжекции	100 Мэв
Магнитное поле при инжекции	76 э
Критическая энергия	8 Гэв
Предельная энергия частиц	76 Гэв
Максимальное магнитное поле на орбите	13 кэ
Ускоряющее напряжение:	
кратность	30
амплитуда	370 кв
Частота	
при инжекции	2,6 Мгц
в конце ускорения	6,05 Мгц
Время ускорения	2,5 сек
Период работы ускорителя	7 сек
Проектная интенсивность	10 ¹² н/протон/имп

НАЛАДКА СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЯ

Кольцевой электромагнит

Электромагнит протонного синхротрона составляют 120 магнитных блоков, каждый из которых включает пять пакетов, охваченных общей обмоткой. Пакеты набраны из листов кремнистой стали толщиной 2 мм, причем профиль листа штамповался без последующей обработки. Пакеты каждого блока установлены на опорной плите и могут перемещаться по ней в горизонтальном и вертикальном направлениях. Опорная плита, в свою очередь, также может юстироваться с помощью специальных домкратов.



Р и с. 1. Вид участка кольцевого зала в районе ввода пучка.

Основная обмотка электромагнита изготовлена из алюминиевой шины с каналом для охлаждающей воды. Общий вид участка кольцевого зала с установленными магнитными блоками показан на рис. 1.

Система охлаждения электромагнита должна отводить тепло в количестве около $2 \cdot 10^7$ ккал/ч, причем электрическое сопротивление теплоносителя должно быть не менее $5 \cdot 10^5$ ом·см, чтобы токи утечки по нему не приводили к искажению азимутального распределения магнитного поля.

В качестве теплоносителя применена деминерализованная вода, получаемая в обессоливающих установках с ионообменными смолами и имеющая сопротивление $2 \cdot 10^6$ ом·см.

Система питания электромагнита. Возбуждение кольцевого электромагнита производится через интронные выпрямители от четырех мотор-генераторных установок с маховиками. По переменному току генераторы соединены в кольцо. Выпрямленное напряжение от попарно соединенных установок подается раздельно на верхнюю и нижнюю обмотки электромагни-

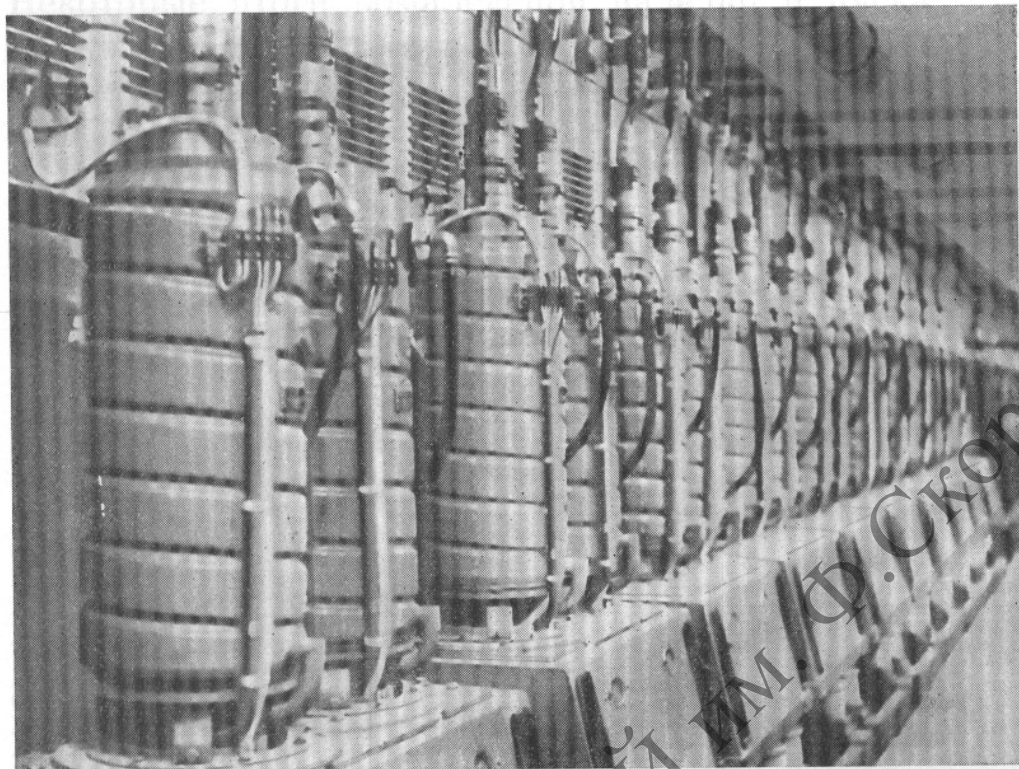
та. Амплитуда суммарного тока в обмотках 10 кА, пиковая мощность питания 100 Мвт. На рис. 2 приведен вид зала интронных выпрямителей.

Во время пусковых работ параметры цикла магнитного поля были такими же, как при магнитных измерениях на собранном электромагните. В процессе наладки были получены следующие временные характеристики цикла: время нарастания тока — $2,45 \pm 0,02$ сек, время спада тока — $1,93 \pm 0,02$ сек, время паузы — $2,57 \pm 0,03$ сек.

Применение фильтра с подзарядом емкости обеспечивало пульсации скорости нарастания магнитного поля, не превышающие $\pm 0,5\%$.

Магнитные измерения. Пакеты были расставлены в блоки по результатам измерений их магнитных характеристик. Пакеты и блоки расставляли по кольцу так, чтобы подавить основные резонансные гармоники искажений магнитного поля.

Из-за малого уровня поля инъекции форма орбиты весьма чувствительна к небольшим



Р и с. 2. Общий вид зала игитронных выпрямителей.

внешним полям, токам утечки и т. д., поэтому для получения окончательных данных о магнитном поле ускорителя (включая поля в прямолинейных промежутках) были выполнены магнитные измерения на собранном магните при номинальном возбуждении. Измерения подтвердили, что характеристики магнитного поля удовлетворительны: среднеквадратичный разброс полей блоков на уровне инжекции не превышает 0,15% (искажения орбиты меньше ± 5 см), а на средних и больших полях — 0,04% [4].

Геодезические измерения. Установку блоков электромагнита производили относительно специальной геодезической сети, включающей 60 равномерно распределенных по азимуту опорных реперов.

В предпусковой период была измерена стабильность положения блоков электромагнита по высоте и горизонтали, а также определены деформации самих магнитных блоков. Оказалось, что смещения блоков происходят по нескольким причинам, важнейшие из которых: установка бетонной защиты в эксперименталь-

ном зале (оседание блоков до 1,5 мм); выемка грунта в непосредственной близости от блоков электромагнита при строительстве новых экспериментальных залов (поднятие блоков до 1,5 мм); дополнительная обваловка по всей длине кольца; изменения гидротермических условий в слоях горных пород, служащих основанием для строительных конструкций. Однако такие значительные смещения блоков приводят к искажениям равновесной орбиты, не превышающим ± 7 мм. Это объясняется плавностью деформации и отсутствием гармоник, близких к резонансным.

Системы коррекции позволяют регулировать основные характеристики магнитного поля, определяющие работу ускорителя. Форма равновесной орбиты по горизонтали и вертикали, частота бетатронных колебаний, нелинейности магнитного поля и другие параметры могут корректироваться в течение всего цикла ускорения вплоть до предельных значений напряженности магнитного поля. Для области поля инжекции предусмотрены дополнительные системы, включающие пассивную коррекцию

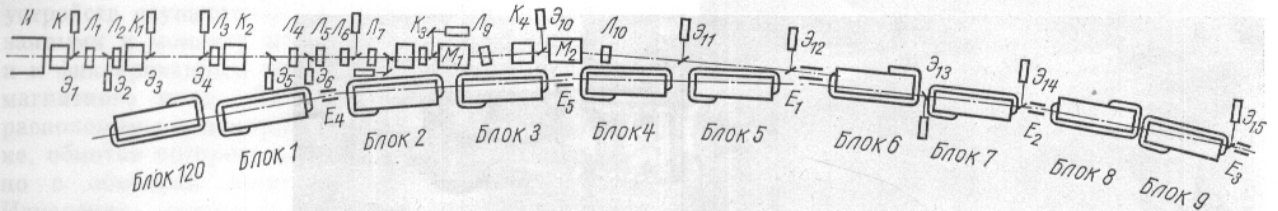


Рис. 3. Схема инжекции частиц в кольцевой ускоритель:

И — инжектор; Л₁₋₁₀ — линзы; К₀₋₄ — корректора; Э₁₋₁₅ — экраны; Е₁₋₅ — инфлекторные пластины; М_{1,2} — поворотные магниты.

остаточного поля во всех блоках, коррекцию равновесной орбиты по участкам (20 участков) и коррекцию переходных процессов. Последняя система необходима из-за того, что электромагнит представляет собой длинную линию, при подаче напряжения на которую возникает переходный процесс, существенно искажающий распределение магнитного поля по азимуту.

Для коррекции величины вертикальной составляющей магнитного поля используются обмотки, размещенные на каждом блоке в одном кожухе с основной обмоткой. Другие параметры магнитного поля (градиент, средняя плоскость, нелинейность поля) корректируются обмотками, расположенными на поверхности полюсов блоков.

Система инжекции

Система инжекции, транспортирующая протоны от инжектора до равновесной орбиты ускорителя, состоит из согласующего канала и устройств ввода (рис. 3).

Согласующий канал. Магнитная оптика канала состоит из десяти квадрупольных линз, двух поворотных магнитов и пяти корректоров, с помощью которых осуществляется согласование эмиттанса пучка из линейного ускорителя с акцептансом синхротрона. Из-за большой длины тракта вода (~80 м) была выбрана система канального типа, состоящая из поочередно расположенных фокусирующих и дефокусирующих линз. Часть канала ввода видна на рис. 4.

Перед монтажом элементов оптики были проведены магнитные измерения и выполнено шиммирование линз, позволившее существенно расширить область однородного градиента. Системы питания линз обеспечивают долговременную стабильность градиента и поля с точностью $\pm 0,5\%$ в линзах и корректорах и с точностью $\pm 0,1\%$ в поворотных магнитах. Канал рассчитан таким образом, чтобы наряду с согласованием эмиттанса пучка с акцептансом уско-

рителя в месте расположения дебаunchера (дебаunchер расположен между линзами Л₅ и Л₆, см. рис. 3) получить кроссовер пучка минимальных размеров.

Устройства ввода состоят из одной пары электростатических пластин и четырех пар импульсных пластин (соответственно Е₁ и Е₂ — Е₅, см. рис. 3).

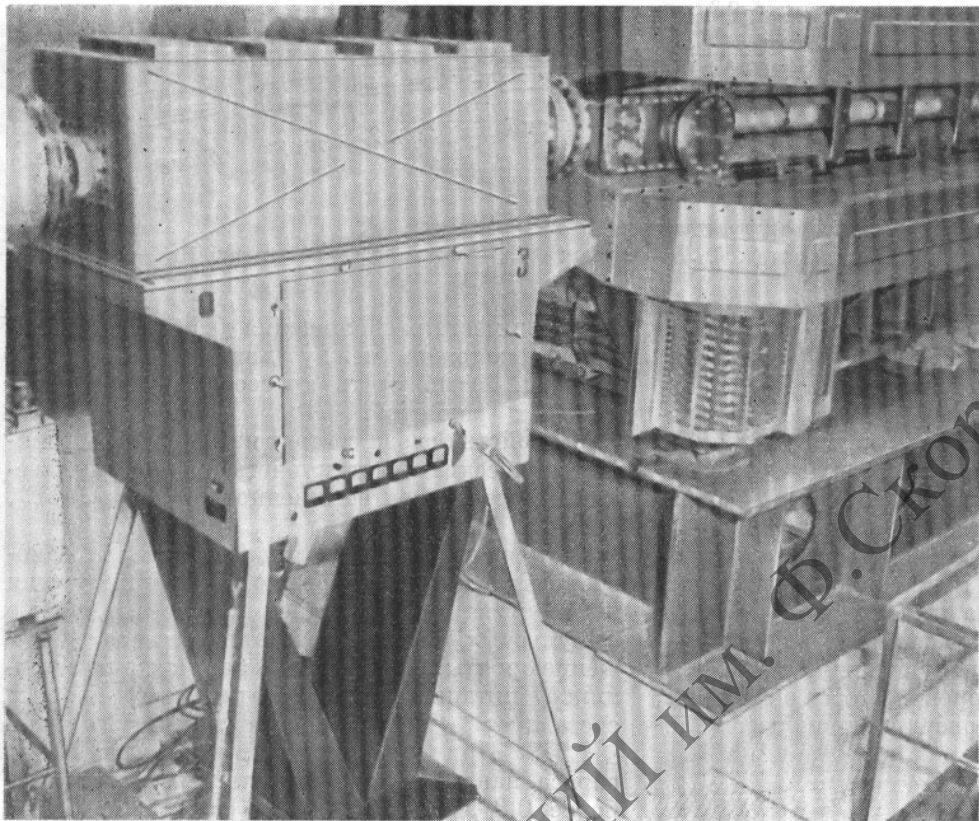
Системы питания пластин обеспечивают однооборотную и трехоборотную инжекции частиц в ускоритель. В последнем случае с помощью импульсных пластин создается местное возмущение орбиты. Стабильность напряжения источников питания электростатических пластин составляет $\pm 0,1\%$, а импульсных пластин $\pm 0,5\%$. При однооборотной инжекции время сброса напряжения с импульсных пластин не более 0,3 мксек.

Вакуумная система

Вакуумная камера ускорителя эллиптического сечения с осями 115 × 195 мм изготовлена из гофрированной нержавеющей стали толщиной 0,4 мм марки 1Х18Н10Т. Вся камера делится вакуумными затворами на 20 участков, что создает возможность раздельной откачки. В большинстве соединений применены металлические уплотнения из алюминия. Для поддержания рабочего вакуума в камере и канале ввода используется 132 электроразрядных титановых насоса НЭМ-300, имеющих скорость откачки по 300 л/сек. Для получения предварительного вакуума и запуска титановых насосов на каждом из 20 участков установлен форвакуумный механический насос ВН-1МГ с полупроводниковой ловушкой и насос ВН-2МГ.

Все узлы камеры и вакуумное оборудование были испытаны на стенде. Рабочий вакуум (2—4) · 10⁻⁶ торр был получен через четыре месяца после начала монтажа камеры.

Несколько месяцев эксплуатации вакуумной системы показали, что рабочий вакуум дости-



Р и с. 4. Прямолинейный промежуток с одной из 54 ускоряющих станций.

гается при работе половины установленных насосов НЭМ-300, т. е. камера достаточно герметична и газоотделение стенок мало.

Система радиоэлектроники

Перед запуском ускорителя были налажены радиоэлектронные системы генерирования ускоряющего поля, управления процессом ускорения, радиотехнических измерений и наблюдения за пучком. Вначале отдельные системы настраивались при помощи имитаторов, затем в комплексе с другими системами ускорителя и, наконец, при ускорении протонов.

Система генерирования ускоряющего поля. Ускорение протонов осуществляется при помощи 54 ускоряющих станций, расположенных в прямолинейных промежутках (рис. 4). Каждая станция обеспечивает амплитуду ускоряющего напряжения около 7 кВ, и при номинальных значениях равновесной фазы 30° и скорости нарастания магнитного поля $6,5 \text{ кВ/сек}$ частицы

получают прирост энергии 190 кэВ/об. Ускоряющие станции представляют собой резонансные усилители с автоматической настройкой выходного контура, осуществляемой подмагничиванием феррита. Частота задающего программированного частотно-модулированного генератора изменяется синхронно с напряженностью магнитного поля ускорителя в диапазоне $2,6\text{--}6,1 \text{ МГц}$. Система автоматического управления частотой генератора по радиально-фазовому движению пучка поддерживает закон изменения частоты с точностью $10^{-4}\text{--}10^{-6}$. Для настройки задающего генератора с системой управления частотой по пучку была использована радиотехническая модель пучка. Проведены также работы по повышению скорости перестройки ферритовых резонаторов ускоряющих станций после включения высокочастотного напряжения.

Система управления процессом ускорения. Синхронизация работы основных систем ускорителя, измерительных и контрольных

устройств осуществляется импульсами, привязанными к моменту начала магнитного цикла и к фиксированным значениям напряженности магнитного поля. Датчики магнитного поля расположены в измерительном магнитном блоке, обмотка которого соединена последовательно с обмоткой электромагнита ускорителя. Измерения показали, что долговременная стабильность привязки импульсов лучше $\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$.

Система радиотехнических измерений. В процессе работы ускорителя в каждом цикле ускорения автоматическими измеряются начальное и конечное значения частоты ускоряющего поля, интенсивность пучка ускоренных частиц, временное положение управляющих импульсов и т. д. Показания приборов фиксируются на цифровых табло.

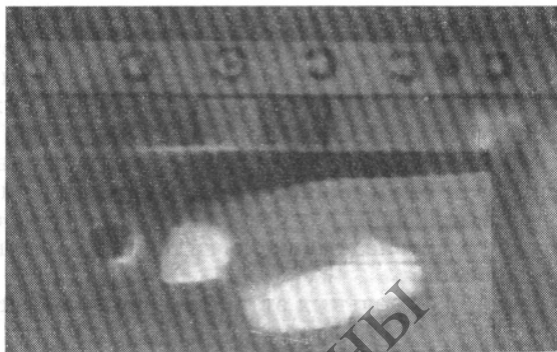
Система наблюдения пучка

На ускорителе предусмотрено измерение параметров пучка как в процессе ускорения, так и при исследованиях динамики частиц на первом обороте.

Наблюдение пучка на первом обороте. Положение пучка и его форма в канале ввода и камере ускорителя на первом обороте определяются при помощи экранов или сеток, покрытых спциллирующим составом. Изображение на экранах и сетках передается телевизионными установками на главный пульт ускорителя. Чувствительность установок позволяет наблюдать 10^8 частиц. Всего на ускорителе и канале ввода расположено 60 экранов и 36 телевизионных камер. Экраны установлены с точностью ± 2 мм. Для измерения интенсивности пучка в канале ввода установлены индукционные датчики тока и цилиндр Фарадея.

Наблюдение пучка при ускорении. В камере ускорителя расположено 85 пар разрезных электростатических индукционных электродов, предназначенных для определения положения равновесной орбиты в процессе ускорения. Такое количество электродов позволяет получать достаточную информацию об отклонениях орбиты от оси камеры в радиальном и вертикальном направлениях (в среднем — девять точек наблюдения на одно бетатронное колебание). Точность измерения положения орбиты в камере при интенсивности 10^{10} — 10^{12} протон/имп составляет $0,1x \pm 1$ мм (x — отклонение пучка от оси камеры).

Разработана также аппаратура, позволяющая измерять распределение частиц по азимуту



Р и с. 5. Изображение на экране пучка, расположенного на седьмой оси.

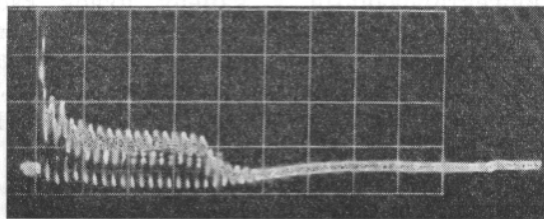
в отдельных сдвигках, частоту бетатронных колебаний и другие величины, определяющие динамику частиц в ускорителе.

ФИЗИЧЕСКИЙ ЗАПУСК УСКОРИТЕЛЯ

При физическом запуске ускорителя основные усилия были направлены на получение ускоренных протонов с проектной энергией. При этом не ставилась задача получения высокой интенсивности ускоренного пучка.

Методика проведения пусковых работ

Вначале исследования велись с узким малоинтенсивным пучком протонов, достаточным, однако, для его надежного наблюдения. Такой пучок весьма удобен при юстировке магнитной оптики согласующего канала и особенно при изучении ввода частиц в кольцевой ускоритель и движения протонов на первом обороте. При интенсивности $\sim 10^8$ протон/имп остаточная радиоактивность оставалась на низком уровне, что очень важно в связи с необходимостью проведения монтажных и наладочных работ во время пуска ускорителя.



Р и с. 6. Оциллограмма циркуляции пучка в камере ускорителя.

Узкий пучок протонов с энергией 100 Мэв формировался коллиматором с отверстием 3×3 мм, установленным на выходе линейного ускорителя-инжектора. При этом ток инжектора понижался до 3–5 ма.

Исследования с пучком значительной интенсивности были начаты после получения циркуляции протонов в камере, на этапе ускорения пучка с автоподстройкой частоты ускоряющего напряжения.

График отдельных этапов запуска ускорителя (в 1967 г.).

1. Начало работы с пучком	28/VIII
2. Проводка пучка по согласующему каналу	1/IX
3. Ввод пучка в кольцевой ускоритель	2/IX
4. Получение первого оборота и режима циркуляции пучка	17/IX
5. Захват в режим ускорения	5/X
6. Ускорение до критической энергии	7/X
7. Ускорение до проектной энергии	14/X

Промежутки между этапами 3–4 и 4–5 в основном были заняты подготовкой вакуумной системы и системы высокочастотного ускорения.

Результаты запуска

Первый оборот протонов в камере ускорителя был получен без коррекции магнитного поля, однако искажения траектории достигали ± 5 см в радиальном направлении и до $\pm 2,0$ см в вертикальном. Осуществление пассивной коррекции блоков электромагнита совместно с коррекцией поля вводного блока, где находится нестандартный участок вакуумной камеры, позволило уменьшить искажения по радиусу до $\pm 2,5$ см. На рис. 5 приведено изображение пучка на экране, расположенном сразу за местом ввода пучка в камеру ускорителя. Изображение на краю экрана — от входящего пучка, а в центре — от пучка, совершившего первый оборот (слева пятно от лампочки подсветки экрана).

При отсутствии ускоряющего напряжения инжектированный в камеру пучок сворачивается в растущем во времени магнитном поле на внутреннюю стенку камеры. Шаг сворачивания для ускорителя в режиме циркуляции $\sim 3,5$ мм. На рис. 6 приведена осциллограмма

сигнала с индукционного электрода в режиме циркуляции. Циркуляция на протяжении 20 оборотов показывает, что искажение равновесной орбиты при инжекции не превышает ± 3 см; это согласуется с измерениями траектории на первом обороте.

Для захвата в режим ускорения протоны инжектировались в камеру с включенным заранее высокочастотным ускоряющим напряжением. При ускорении по программе, без автоподстройки частоты ускоряющего поля по пучку, были получены протоны с энергией 4,4 Гэв. После включения системы автоподстройки и подбора момента скачка фазы ускоряющего поля в районе критической энергии протоны были ускорены до предельной энергии 76 Гэв. Оптимальный режим был получен при ускорении пучка протонов практически на среднем радиусе ускорителя. При этом включение системы управления частотой ускоряющего поля производилось через 1 мсек после начала ускорения. Потери частиц после окончания формирования пучка не превышали 50%. В режим ускорения захватывалось около 15% протонов, инжектируемых в камеру. Максимальная интенсивность пучка с предельной энергией 76 Гэв при запуске ускорителя достигала $1,0 \cdot 10^{10}$ протон/имп*.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность многочисленным коллективам и всем участникам наладки систем и запуска ускорителя.

Поступила в Редакцию 21/VIII 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Владимирский и др. «Атомная энергия», № 4, 31 (1956).
2. Е. К. Тарасов, В. В. Владимирский, Д. Г. Кошкарёв. Препринт ИТЭФ, № 232 (1964).
3. В. В. Владимирский и др. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)» М., Госатомиздат, 1964, стр. 197.
4. В. И. Валбеков, И. А. Шукейло. Препринт ИФВЭ, СКУ 67-58-К (1967).

* В результате исследований, выполненных на ускорителе, и улучшения некоторых параметров систем интенсивность ускоренного пучка в дальнейшем была увеличена до значения $1 \cdot 10^{12}$ протон/имп.