

ШЕСТИМЕТРОВЫЙ СИНХРОЦИКЛОТРОН ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ АН СССР*)

*Д. В. Ефремов, М. Г. Мецераков, А. Л. Минц, В. П. Джелепов,
П. П. Иванов, В. С. Катыхов, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев,
Н. А. Монозон, И. Х. Невяжский, Б. И. Поляков, А. В. Честной*

Рассмотрены основные особенности шестиметрового синхротрона Института ядерных проблем АН СССР, на котором производится ускорение протонов до энергии 680 Мэв.

Введение

Создание мощных ускорителей тяжелых частиц высоких энергий стало возможным после открытия В. И. Векслером (1944 г.) и Мак-Милланом (1945 г.) принципа фазовой устойчивости движения частиц в циклических резонансных ускорителях.

Для развития исследований в области физики частиц высоких энергий, а также для получения опыта по синхротронному методу ускорения в Институте ядерных проблем Академии наук СССР в 1949 г. был закончен сооружением и пущен пятиметровый синхротрон, на котором ускорялись дейтроны до энергии 280 Мэв и α -частицы до энергии 560 Мэв. В 1950 г. на этом синхротроне были получены протоны с энергией 500 Мэв [1]—[3]. Сооружению ускорителя предшествовали исследования на действующей модели, которые позволили выяснить ряд вопросов, связанных с разработкой и пуском пятиметрового синхротрона [4].

Изучение работы пятиметрового синхротрона и опыт, полученный при проведении на нем исследований, позволили в 1953 г. реконструировать ускоритель и повысить

энергию ускоренных протонов до 680 Мэв. Средний ток на крайних орбитах составляет при этом 0,3 мка. Общий вид шестиметрового синхротрона изображен на рис. 1.

При реконструкции синхротрона была изготовлена новая вакуумная камера, увеличен до 6 м диаметр полюсов электромагнита и разработана новая высокочастотная резонансная система. Шестиметровый синхротрон позволяет получать интенсивные пучки положительных и отрицательных π -мезонов с энергией до 400 Мэв и нейтронов с энергией вплоть до 600 Мэв. При незначительном изменении некоторых элементов высокочастотной резонансной системы на этом синхротроне можно получить также дейтроны с энергией 420 Мэв и α -частицы с энергией 840 Мэв [5], [6].

Электромагнит

Как известно, пространственно устойчивое движение ионов в зазоре электромагнита ограничивается зоной, в которой показатель радиального спада напряженности магнитного поля

$$n = \frac{d \ln H}{d \ln R} \leq 0,2,$$

так как при $n=0,2$ наблюдается параметрический резонанс между свободными верти-

*) Доложено на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий 14 мая 1956 г.

кальными и радиальными колебаниями ускоряемых ионов.

В реальных ускорителях вследствие ограниченности вертикального размера апертуры дуанта зона возникновения параметрического резонанса определяет максимальный радиус области магнитного поля, в которой практически возможно ускорение ионов. В связи

нитного поля в центре вакуумной камеры составляет 16 600 э. Длина электромагнита 18 м, высота—около 10 м, вес—около 7000 т. Магнитопровод изготовлен из обычной углеродистой стали. Обмотки возбуждения электромагнита выполнены из полосовой меди и имеют воздушное охлаждение. Мощность генератора постоянного тока, необходимая

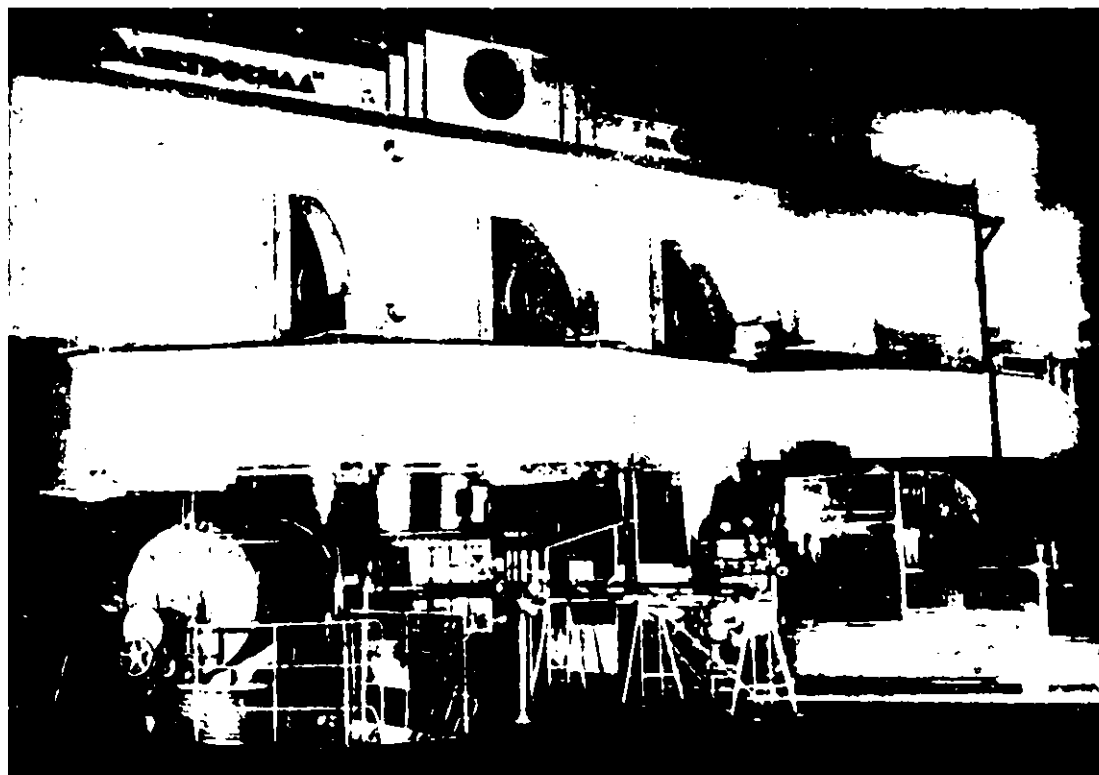


Рис. 1. Общий вид ускорителя.

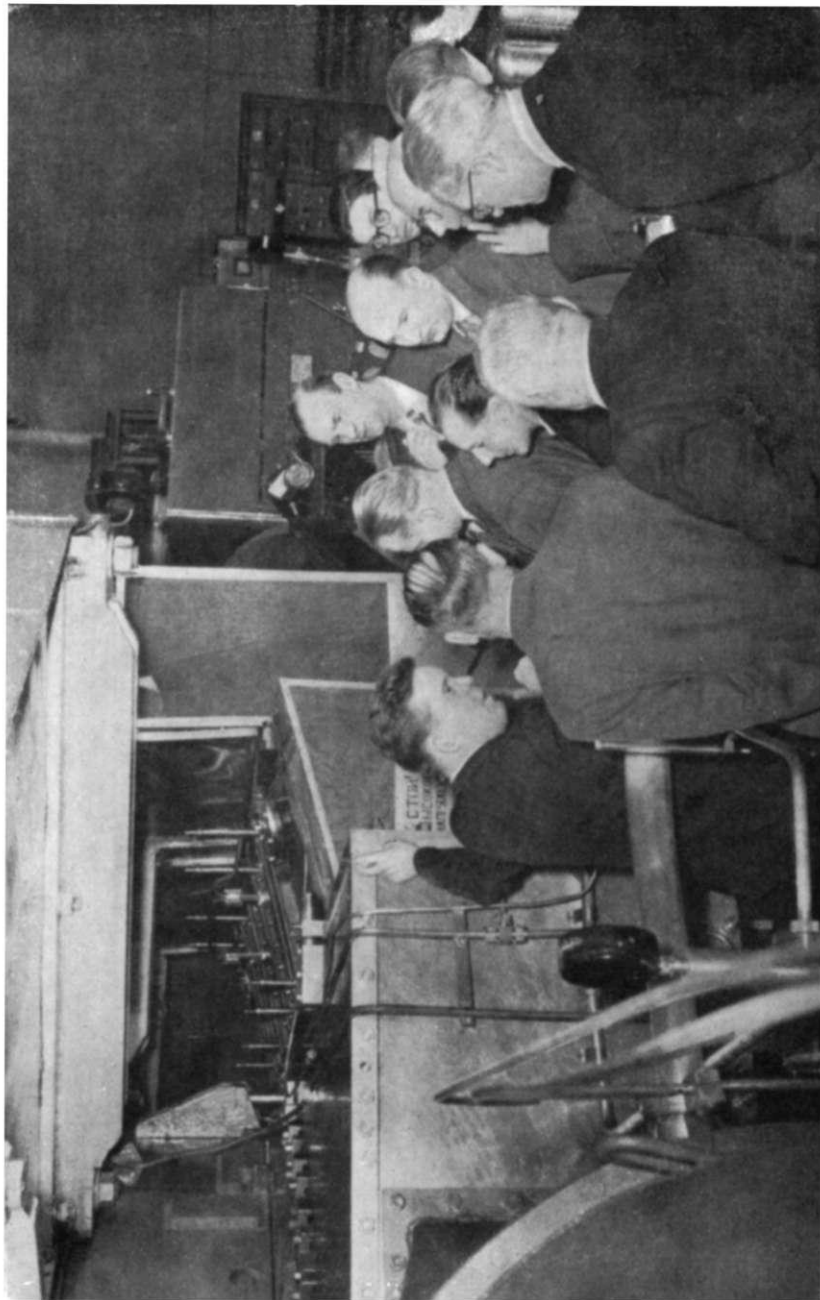
с этим вопросу максимального увеличения радиуса устойчивых орбит ускоряемых ионов было уделено большое внимание.

При диаметре полюсов электромагнита в 5 м полюсные наконечники были изготовлены в виде цельных дисков из мягкого железа. Используемые сейчас наконечники диаметром в 6 м сварены из нескольких частей.

Полюсные наконечники одновременно являются верхней и нижней крышками вакуумной камеры, установленной в зазоре между полюсами электромагнита. Зазор между полюсными наконечниками в центре камеры равен 600 мм. Напряженность маг-

нитного поля, составляющая около 1000 кэВ. Ток в обмотках электромагнита стабилизирован с точностью $\pm 0,1\%$.

Весьма трудоемкие вычислительные и экспериментальные работы были проведены по корректировке магнитного поля в зоне ускорения частиц. При этом кроме подбора обычных шимм в периферийной области полюсных наконечников были выполнены значительные работы по совмещению поверхности, на которой радиальная составляющая магнитного поля равна нулю, со средней геометрической плоскостью ускорительной камеры.



Участники Международного совещания по вопросу об организации Восточного института ядерных исследований в Институте ядерных проблем Академии наук СССР осматривают синхротрон на 680 Мэв (март 1956 г.).

Проведение работ по исправлению конфигурации магнитного поля потребовало разработки специальной аппаратуры для тонких магнитных измерений: прибора для измерения радиального спада напряженности магнитного поля [1], прибора для определения азимутальной асимметрии магнитного поля [7] и устройств для определения положения поверхности, где радиальная составляющая магнитного поля имеет нулевое значение.

В результате исследований и корректировки магнитного поля шестиметрового синхротрона радиус зоны, в которой обеспечена пространственная устойчивость движения ускоряемых ионов, удалось довести до 279 см.

В описываемом синхротроне применено дополнительное несимметричное питание обмоток возбуждения электромагнита от отдельного регулируемого генератора, позволяющее изменять положение плоскости траектории ускоряемых частиц в процессе работы ускорителя, что используется при подборе оптимального режима*).

Радиальный спад напряженности магнитного поля от центра до предельного радиуса, необходимый для фокусировки частиц в вертикальной плоскости, составляет 4,9%. Смещение центра крайних орбит не превышает 2 см. Тщательная корректировка магнитного поля ускорителя позволила ускорить протоны до энергии 680 Мэв [8]. В центре полюсных наконечников установлены стальные конусы для усиления фокусировки ионов в начальной стадии ускорения.

Предусмотрена возможность относительно быстрого изменения полярности полюсов электромагнита (в течение 15 мин.) для улучшения условий вывода π^+ - и π^- -мезонов различных энергий через коллиматоры, установленные в специальных отверстиях в боковой стойке электромагнита.

Резонансная система и высокочастотный генератор [9]

Конструкция высокочастотной системы описываемого синхротрона обусловлена необходимостью получения амплитуды уско-

ряющего напряжения 15 кэ при изменении частоты собственных колебаний резонансной системы в процессе ускорения протонов от 26,5 до 13,6 Мгц. При этом металлический ротор конденсатора переменной емкости—вариатора частоты, во избежание значительных вихревых токов, должен размещаться в слабом магнитном поле. С другой стороны, удаление вариатора в область малых значений напряженности поля рассеяния электромагнита нецелесообразно из-за чрезмерного удлинения системы. Поэтому была применена усиленная магнитная экранировка вариатора, установленного в месте, где напряженность поля составляет 600—800 э. Внутри экрана напряженность поля не превышает 30 э. Однако и в этих условиях расстояние от центра полюсов до вариатора частоты равно примерно половине самой короткой длины волны рабочего диапазона. Поэтому для осуществления настройки системы в заданном диапазоне частот потребовалось повысить верхнюю частоту собственных колебаний системы как за счет специального выбора волнового сопротивления системы, так и за счет применения конструкции, которая в минимальной степени удлиняла пути тока вдоль системы. Расширение диапазона в сторону низких частот осуществлено в основном путем повышения волнового сопротивления системы вблизи вариатора. Участок системы в непосредственной близости от вариатора может быть охарактеризован как «сосредоточенная» индуктивность.

Высокочастотная резонансная система состоит из дуанта с заземленной рамкой, вариатора частоты и соединяющей их линии. Последняя вблизи вариатора выполнена в виде коаксиальной цилиндрической линии и подключается к дуанту при помощи специального плавного перехода (рис. 2).

Ротор вариатора, состоящий из 6 дисков с 10 лопастями на каждом, укреплен на изоляторах во внутреннем стебле коаксиальной линии и электрически соединен с ней цилиндрическим (из 6 пар цилиндров) конденсатором емкостью в 20 000 пф. Стебель с ротором поддерживается тремя металлическими опорами, радиально расположенными вблизи центра тяжести конструкции. Для увеличения реактивного сопротивления опор в широком диапазоне частот они выполнены в виде цилиндрических спиралей—дросселей из специальных пустотелых стальных труб, охла-

*) Изменение положения указанной плоскости позволяет также плавно уменьшать во много тысяч раз интенсивность выведенного пучка протонов, что бывает необходимо при проведении некоторых физических экспериментов.

ждаемых водой и омедненных для уменьшения высокочастотных потерь. Индуктивность этих опор включена параллельно линии и несколько повышает верхнюю частоту рабочего диапазона.

Указанная конструкция высокочастотной резонансной системы позволила получить

ники и контактную щетку не превышает 100 а. Это обеспечивает устойчивую работу установки без замены подшипников в течение 10 000 час.

Конструкция ротора позволяет осуществить переменную емкостную связь резонансной системы с высокочастотным генера-



Рис. 2. Дуант, вынутый из вакуумной камеры.

широкий диапазон рабочих частот при относительно небольших значениях тока и напряжения на вариаторе. Благодаря этому удалось получить амплитуду ускоряющего напряжения свыше 15 кВ, а частоту повторения циклов ускорения около 100 гц.

Полицилиндрический конденсатор эффективно шунтирует шариковые подшипники ротора и защищающую их контактную щетку, выполненную в виде бронзового разрезного кольца, охватывающего стальной вал ротора. В то время как максимальный ток через вариатор достигает 3000 а, ток через подшип-

натором и получить оптимальные значения изменяющего импеданса системы в широком диапазоне применяемых частот.

Генерирование паразитных колебаний радикально устранено путем применения схемы «полосного» высокочастотного генератора, в котором положительная обратная связь осуществляется только в заданном диапазоне частот; при этом возможна широкая и независимая регулировка абсолютной величины обратной связи в непосредственной близости к верхней границе частот диапазона и на его низких частотах. В схеме используются

последовательные цепи LC между анодом и вводом катода и между вводами сетки и катода двух генераторных ультракоротковолновых триодов типа ГУ-12А с заземленной сеткой, а также индуктивности их вводов, междуэлектродные емкости и катодный дроссель.

Работа резонансной системы, а также схема высокочастотного генератора подробно освещены в отдельном докладе [6].

Генератор высокой частоты может запирается в течение нерабочей части цикла при помощи тиратронного манипулятора, воздействующего на сетки этого генератора [9]. Возможны режимы работы, при которых циклы ускорения следуют с частотой, в несколько раз меньшей частоты модуляции; есть также возможность получить одиночный цикл ускорения, подавая управляющий сигнал от камеры Вильсона или другого измерительного прибора. Все эти режимы работы осуществляются при помощи специального таймерного устройства [10], обеспечивающего строгое следование во времени импульсов, управляющих работой ионного источника, манипулятора и других устройств. Таймерное устройство позволяет также осуществлять синхронизацию работы разнообразных приборов и устройств, применяемых для ядерных исследований, с работой ускорителя. Все перечисленные процессы привязаны к циклу изменения частоты высокочастотного генератора, питающего резонансную систему. Включение высокочастотного напряжения производится перед каждым циклом ускорения при помощи фотоэлектрической системы, в которой луч света, падающий на фотоэлектронный умножитель, прерывается лопастями ротора вариатора.

Вакуумная система

Устойчивость работы ускорителя, а также интенсивность пучка ускоренных ионов на выходе в значительной степени определяются вакуумными условиями в объемах камеры и вариатора частоты. Вакуумная камера ускорителя выполнена в виде прямоугольного параллелепипеда объемом $675 \times 675 \times 100 \text{ см}^3$.

Эта камера собрана из латунных плит толщиной 100 мм. Стальные крышки камеры являются одновременно полюсными накопечниками. Герметичность мест соединений латунных плит камеры и полюсных наконечников как и других вакуумных устройств,

достигается при помощи резиновых уплотнений.

После соответствующей тренировки камеры минимальное давление остаточного газа в ней составляет $2 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ При подаче в ионный источник рабочего газа давление в камере не превышает $6\text{--}7 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ Объемы камеры, резонансной линии и кожуха вариатора соединены между собой. Суммарный объем, в котором создается высокий вакуум, составляет около 35 м^3 . Вакуумная камера откачивается двумя пароструйными масляными насосами общей производительностью $80\,000 \text{ л/сек}$ при давлении $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ Кожух вариатора откачивается дополнительным насосом производительностью около $10\,000 \text{ л/сек}$ при давлении $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ Для вымораживания паров масла отражатели высоковакуумных насосов охлаждаются до температуры -20°C .

Качество вакуумных уплотнений таково, что в нормальных условиях повышение давления в камере, обусловленное натеканием воздуха извне и газоотделением ее внутренних поверхностей, составляет $0,2\text{--}0,3 \text{ мк/час}$. Если в камере предварительно создано давление около $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$, то рабочий вакуум в отреннированном ускорителе достигается через $25\text{--}30$ мин. после открывания вакуумных затворов пароструйных масляных насосов.

В вакуумной камере ускорителя предусмотрены различные устройства, позволяющие вводить внутрь камеры мишени и устанавливать их на заданном радиусе. Эти операции совершаются дистанционно, без нарушения рабочего вакуума в камере.

Источник ионов и вывод частиц

В качестве источника ионов в шестиметровом синхроциклотроне применяется обычный дуговой источник с накаливаемым вольфрамовым катодом. С большим успехом применяется также источник с холодным катодом. В этом случае удается получить значительно более высокую стабильность величины тока ионов при нормальной интенсивности. В источнике с холодным катодом разряд возбуждается высокочастотным полем дуанта за счет вторичной эмиссии электронов бериллиевого или алюминиевого катода.

Вывод пучка протонов из вакуумной камеры во внешнее пространство осуществ-

вляется путем возбуждения радиальных колебаний ускоренных частиц в зоне крайних орбит и заброса протонов в магнитный канал [11]. Ток ионов в выведенном пучке составляет 5—7% от тока циркули-

Размещение оборудования ускорителя

Все оборудование ускорителя размещено в двух зданиях. В основном здании находится оборудование, которое по условиям

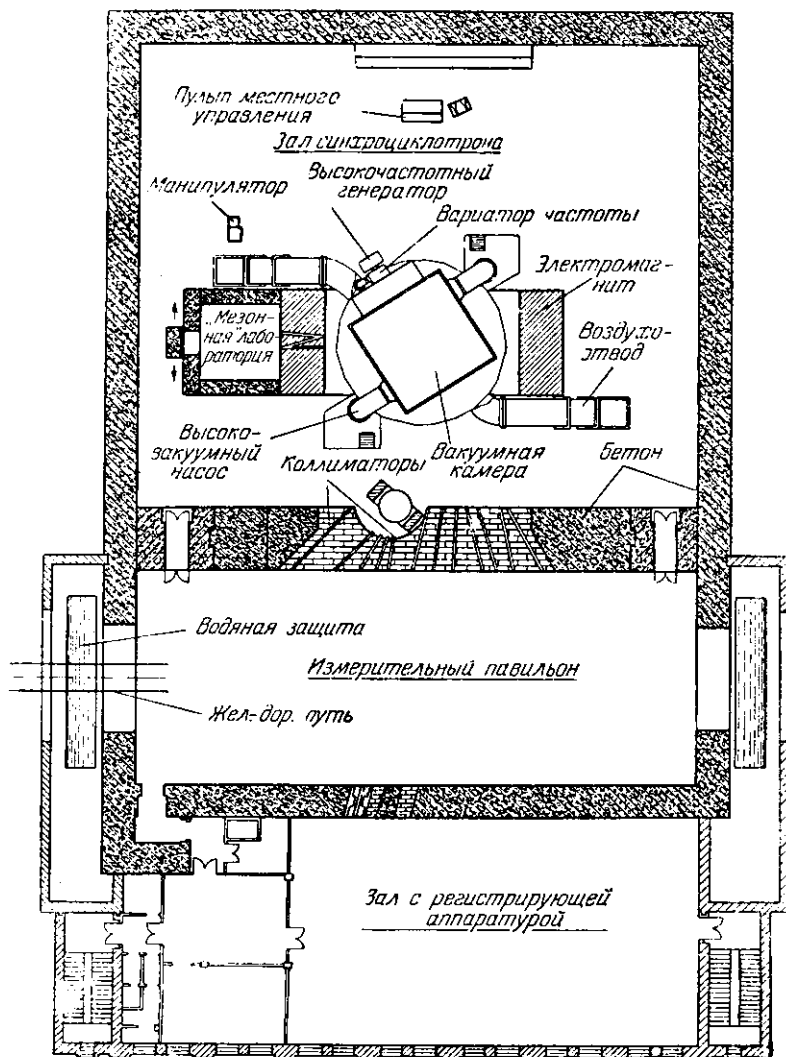


Рис. 3. План здания шестиметрового синхроциклотрона.

рующего пучка. Кроме того, выводится значительное число пучков нейтронов и заряженных π -мезонов обоих знаков. Вывод каждого пучка производится при помощи специальных устройств, размещенных в ускорителе. Описанию вывода пучков частиц из вакуумной камеры с указанием их данных посвящено отдельное сообщение [12].

работы не может быть отнесено на значительное расстояние от ускорителя. В этом же здании расположены лаборатории с экспериментальной и регистрирующей аппаратурой для проведения исследований на выведенных пучках частиц.

В целях создания наиболее благоприятных условий для проведения физических ис-

следований с ускоренными частицами главный зал ускорителя отделен от основных лабораторий двумя бетонными защитными стенами толщиной 4 и 2 м, а также перекрытием толщиной 1,5 м. Для пропускания пучков частиц в четырехметровой стене, отделяющей зал ускорителя от измерительного павильона, имеется амбразура с коллиматорами (рис. 3).

ществляются дистанционно дежурными инженером и техником, находящимися в зале главного пульта управления во втором здании (рис. 4). Для этой цели предусмотрен ряд устройств автоматического и дистанционного управления оборудованием.

Опыт эксплуатации показывает, что синхротрон и все его элементы устойчиво



Рис. 4. Главный пульт управления.

Оборудование электрического питания, водяного охлаждения элементов резонансной системы и высокочастотного генератора, а также пульт управления всеми цепями и агрегатами ускорителя размещены во втором здании.

Управление синхротроном

Вследствие радиации, возникающей при работе ускорителя, пребывание персонала в основном зале в непосредственной близости от ускорителя недопустимо. Управление, регулирование условий работы ускорителя, а также контроль за действием его оборудования осу-

работают в течение многих тысяч часов, не требуя длительной остановки для проведения ревизий и ремонта оборудования.

Основные направления ядерных исследований

В круг исследований, выполняемых на синхротроне Института ядерных проблем, входит детальное изучение в области энергий нуклонов 380—660 Мэв следующих трех классов ядерных процессов: упругое рассеяние протонов на протонах, нейтронов на нейтронах и нейтронов нейтронами, образование

заряженных и нейтральных π -мезонов в соударениях нуклонов с нуклонами и взаимодействии π -мезонов с нуклонами. Проводятся также эксперименты по изучению взаимодействия нуклонов и π -мезонов с атомными ядрами. Описание этих исследований выходит за рамки настоящего сообщения и изложено в специальных статьях.

Заключение

На синхротроне Института ядерных проблем, являющемся в настоящее время крупнейшим в мире ускорителем этого типа, десятью физическими и химическими институтами АН СССР систематически проводятся ядерные исследования в области энергий до 700 Мэв.

Ускоритель работает регулярно по 100—105 час. в неделю. Имеется возможность вести исследования на 13 выведенных пучках протонов, нейтронов и π -мезонов высоких энергий.

Сооружение описанного ускорителя явилось результатом совместной работы в течение

ряда лет большого количества ученых, инженеров и конструкторов. В изготовлении оборудования принимали участие многочисленные заводы, особенно электротехнической промышленности.

При разработке отдельных систем шестиметрового синхротрона был выполнен значительный комплекс исследований в области физики, электротехники, радиотехники, электроники и вакуумной техники. Благодаря этому оказалось возможным предвидеть большую часть различных трудностей пускового периода, хотя некоторые из них определились и были преодолены на начальном этапе работы ускорителя.

Совершенно очевидно, что применение синхротронного метода ускорения является весьма целесообразным в определенной области энергий частиц. Опыт работы действующих синхротронов и проведенные расчеты позволяют сделать заключение, что верхний предел энергии для этого метода ускорения протонов лежит, повидимому, около 1000 Мэв.

Поступила в редакцию 29 V 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Г. Мещеряков, А. В. Честной, В. П. Джелепов, В. С. Катывшев, А. А. Кропин, В. П. Дмитриевский и др., Отчет ИЯП АН СССР, 1951 г.
2. Л. М. Гуревич, Н. К. Каминский, И. Г. Кляцкин, И. Х. Невяжский, Б. И. Поляков, Н. К. Титов, В. Ф. Трубецкой, Отчеты РАЛАН СССР, 1947—1950 гг.
3. Д. В. Ефремов, Е. Г. Комар, Н. А. Монозон, Отчет НИИЭФА, 1950 г.
4. М. Г. Мещеряков, Г. И. Будкер, В. П. Дмитриевский, В. С. Катывшев, А. А. Кропин, А. В. Честной и др., Отчет ИЯП АН СССР, 1947—1949 гг.
5. М. Г. Мещеряков, А. В. Честной, В. П. Джелепов, В. С. Катывшев, М. Ф. Шульга, В. П. Дмитриевский, Отчет ИЯП АН СССР, 1954 г.
6. А. Л. Минц, И. Х. Невяжский, Б. И. Поляков, Некоторые особенности и основные данные высокочастотной системы шестиметрового синхротрона (Доклад на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, Москва, 1956).
7. М. П. Зельдович, С. М. Рубчинский, Отчет РАЛАН СССР, 1949 г.
8. А. В. Честной, В. С. Катывшев, В. П. Дмитриевский, А. А. Кропин, Б. И. Замолотчиков, Т. Н. Томилина, В. Б. Мухина, Отчеты ИЯП АН СССР, 1953 г.
9. А. Д. Власов, Г. П. Грудинская, Г. И. Жилейко, Б. Т. Зарубин, В. Г. Кульман, В. М. Лупулов, И. Х. Невяжский, Б. И. Поляков, Отчеты РАЛАН СССР, 1948—1955 гг.
10. М. М. Вейсбейн, Г. И. Кирьянов, А. К. Котляков, Отчет РАЛАН СССР, 1954 г.
11. В. П. Дмитриевский, В. И. Данилов, Ю. Н. Денисов, В. С. Катывшев, А. А. Кропин, А. В. Честной, Вывод пучка протонов из шестиметрового синхротрона (Доклад на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, Москва, 1956).
12. В. П. Джелепов, В. П. Дмитриевский, В. С. Катывшев, М. С. Коодаев, М. Г. Мещеряков, К. И. Тараканов, А. В. Честной, Пучки частиц высоких энергий от шестиметрового синхротрона и их использование. Там же.