

В 381.1

М. 43

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО УСКОРИТЕЛЯМ

Дубна, 21—27 августа 1963 г.

Под редакцией

А. А. КОЛОМЁНСКОГО (главный редактор),
А. Б. КУЗНЕЦОВА, А. Н. ЛЕБЕДЕВА

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:
МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЧИСТОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
И ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

Председатель Оргкомитета конференции В. И. ВЕКСЛЕР



АТОМИЗДАТ
Москва 1964

**РАБОТЫ ПО ВСТРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫМ,
ПОЗИТРОН-ЭЛЕКТРОННЫМ И ПРОТОН-ПРОТОННЫМ ПУЧКАМ
В ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР**

I. ВСТРЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

*В. Н. Байер, Г. А. Блинов, Л. Н. Бондаренко, Г. И. Будкер,
Б. Г. Ерозолимский, Л. С. Коробейников, Е. С. Миронов, А. А. Наумов,
А. П. Онучин, В. С. Панасюк, С. Г. Попов, В. А. Сидоров,
Г. И. Сильвестров, А. Н. Скринский, А. Г. Хабахпашев*

II. ВСТРЕЧНЫЕ ПОЗИТРОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

*В. Л. Ауслендер, В. Н. Байер, Г. А. Блинов, Г. И. Будкер,
А. В. Киселев, Е. А. Кушницренко, А. А. Лившиц, Е. С. Миронов,
А. А. Наумов, В. С. Панасюк, С. Н. Родионов, В. А. Сидоров,
В. И. Сильвестров, А. Н. Скринский, В. С. Сынах, Л. И. Юдин*

III. ВСТРЕЧНЫЕ ПРОТОН-ПРОТОННЫЕ ПУЧКИ

*Е. А. Абрамян, В. Н. Байер, Г. И. Будкер, С. Б. Вассерман,
В. В. Вечеславов, Г. И. Димов, А. А. Наумов, В. С. Панасюк,
В. А. Пападичев, И. Я. Протопопов*

Институт ядерной физики СО АН СССР

(Докладчик Г. И. БУДКЕР)

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР работы по встречным пучкам заряженных частиц составляют основное содержание программы по физике частиц высоких энергий. Мы считаем нецелесообразным сооружение в нашем институте крупных ускорителей, строительство которых требует больших средств и длительного времени. Для работы по встречным электрон-электронным, позитрон-электронным и протон-протонным пучкам сооружаются три установки, находящиеся в разной степени готовности.

Работа со встречными электронными пучками была поставлена в институте (тогда лаборатории Института атомной энергии им. И. В. Курчатова) осенью 1956 г. после сообщения Керста об ускорителях со встречными протонными пучками типа FFAG. К этому времени у нас уже был опыт получения больших электронных токов; в частности, в лаборатории была сооружена и запущена установка со спиральным накоплением электро-

нов [1], на которой в последующем были получены циркулирующие токи порядка 100 а. В 1957 г. одновременно рассматривались два варианта. Первый представлял собой два ускорителя со спиральным накоплением и последующим переводом частиц в синхротронный режим на сравнительно узких дорожках, второй — накопительные кольца с постоянным магнитным полем и многократной внешней инжекцией за счет затухания колебаний под действием излучения. Первый вариант более громоздкий, второй содержал не разработанный в то время элемент: коммутатор на 100 кВ и 10 кА с наносекундным фронтом. В конце 1957 г. были получены первые положительные результаты с уплотняющим разрядником на 100 кВ, и мы остановились на варианте с накопительными кольцами.

Первоначально предполагалось сооружение двух установок: ВЭП-1 на энергию 2×130 МэВ и ВЭП-2 на энергию 2×500 МэВ. Установка ВЭП-1 рассматривалась как действующий макет ускорителя и как установка для отладки аппаратуры и постановки первых экспериментов на низких энергиях. После

появления в 1958 г. сообщения Панофского о работах со встречными электронными пучками, поставленных в его лаборатории в Стэнфорде, мы отказались от сооружения накопительных дорожек на 500 Мэв и продолжали работу с установкой на 2×130 Мэв.

Взамен работы по встречным электронным пучкам с энергией 500 Мэв в конце 1958 г. была поставлена работа со встречными позитрон-электронными пучками и начато проектирование установки ВЭПП-2, основными элементами которой являются сильноточный электронный ускоритель и высоковакуумная накопительная дорожка на энергию 700 Мэв.

В настоящее время установки ВЭП-1 и ВЭПП-2 сооружаются в г. Новосибирске. Установка ВЭП-1 находится в стадии запуска и в конце этого года предполагается приступить к экспериментам на ней. На установке ВЭПП-2 заканчивается монтаж.

Чтобы получить заметный эффект от применения встречных протонных пучков, необходим ускоритель на энергию, по меньшей мере, 10 Гэв. Так как обычный ускоритель на такие энергии представляет собой весьма крупное сооружение, было принято решение объединить идею встречных протонных пучков с доложенной нами на Московской конференции 1956 г. работой по созданию безжелезного импульсного ускорителя с большими полями и уравновешенной центральной шиной. Наличие в безжелезном ускорителе с центральной шиной поля двух направлений позволяет ускорять протоны в противоположные стороны в одной установке, что при соответствующей форме рейстрекла даст возможность осуществить и встречу протонов. В настоящее время в институте разрабатывается протонная установка с магнитным полем около 200 кгс и радиусом 2 м на энергию частиц в пучке 12 Гэв (эквивалентная энергия около 300 Гэв), проводятся испытания на моделях, экспериментально изучается эффективный метод инъекции путем перезарядки отрицательных ионов, разрабатывается система импульсного электропитания энергоемкостью 100 Мдж и система ВЧ-питания.

С 1958 г. в институте ведутся теоретические работы по исследованию пределов применимости квантовой электродинамики [2, 3], по вычислению радиационных поправок к электродинамическим сечениям [2—6] и по другим вопросам физики частиц высоких энергий, связанным с подготовкой экспериментов по встречным пучкам [2, 7—10].

1. ВСТРЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

Работы по встречным электрон-электронным пучкам предполагают постановку эксперимента по упругому рассеянию электронов на электронах при энергии 2×130 Мэв. Это позволит изучить взаимодействие электронов при величине передаваемого импульса, недоступной другим методам, и точности измерений около 10%, а также проверить применимость законов квантовой электродинамики на расстояниях порядка 0,1 ферми. Имеющиеся в настоящее время сведения о справедливости законов квантовой электродинамики в этой области расстояний базируются на двух экспериментах: первый — изучение упругого рассеяния быстрых электронов на протонах — свидетельствует о том, что эффективная длина, характеризующая нарушение законов квантовой электродинамики, должна быть не больше 0,3 ферми; второй — измерения аномального магнитного момента мюона — отодвигает эту границу до вдвое меньшей величины. Эксперимент по упругому рассеянию электронов на электронах при энергии 2×130 Мэв представляет значительный интерес, несмотря на то что он, по-видимому, не обнаружит отклонений от квантовой электродинамики и не расширит пределов ее применимости.

Наша установка со встречными электрон-электронными пучками ВЭП-1 (рис. 1) состоит из сильноточного электронного синхротрона Б-2С, спаренной системы двух высоковакуумных магнитных дорожек, электронно-оптического канала для перевода пучка из ускорителя на дорожки (рис. 2) и системы однооборотного вывода и ввода.

1. Ускоритель-инжектор

В качестве инжектора используется разработанный в нашем институте импульсный безжелезный сильноточный синхротрон Б-2С со спиральным накоплением электронов. Конструкция синхротрона рассчитана на получение электронов с энергией до 100 Мэв. В настоящее время ускоритель работает на энергии 40 Мэв. Ток выведенного пучка в импульсе длительностью меньше 10 нсек — около 300 ма (больше 10^{10} частиц). Разброс по энергии не превышает 0,2%; частота повторения циклов ускорения — один раз в 30 сек. Несмотря на низкую среднюю интенсивность

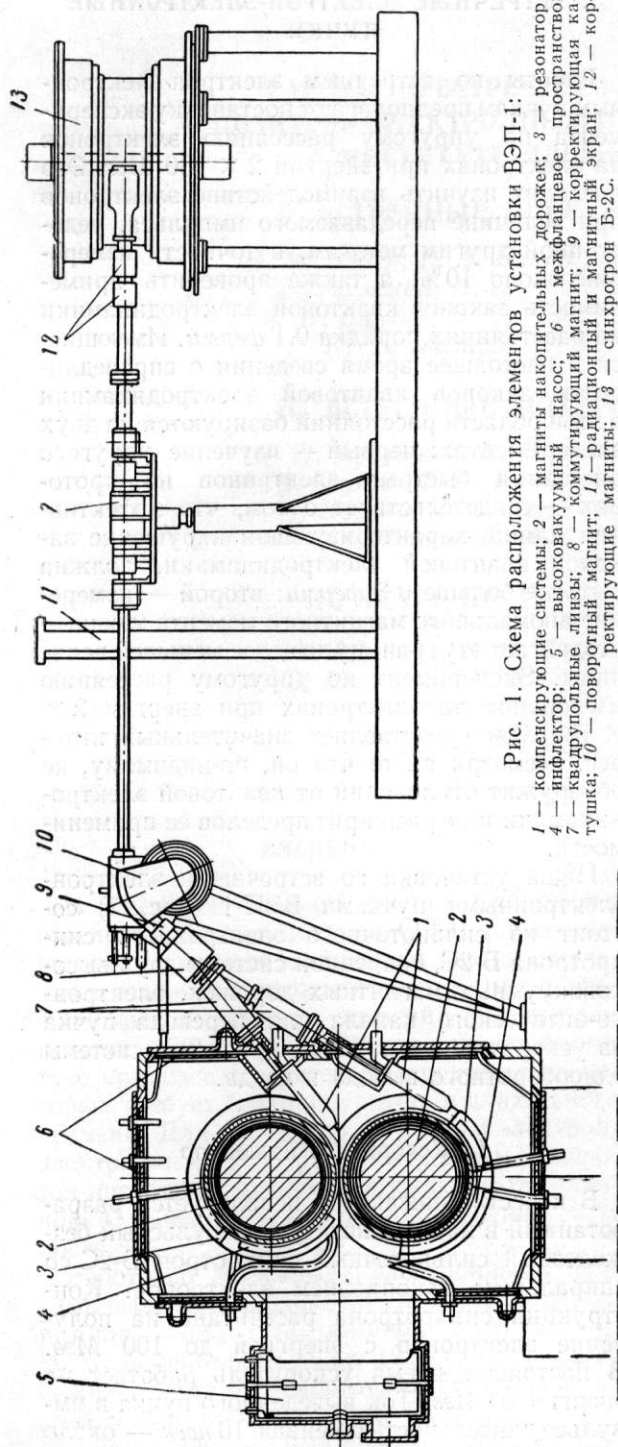


Рис. 1. Схема расположения элементов установки ВЭП-1:

1 — компрессирующая система; 2 — магниты накопительных дорожек; 3 — резонатор; 4 — инфлектор; 5 — высоковакуумный насос; 6 — межфланцевое пространство; 7 — квадрупольные линзы; 8 — коммутирующий магнит; 9 — корректирующая катушка; 10 — поворотные магниты; 11 — радиационный и магнитный экран; 12 — корректирующие магниты; 13 — синхротрон Б-2С.

пучка, обусловленную малой частотой повторения, такой синхротрон благодаря малой длительности электронного импульса и хоро-

шей моноэнергетичности может успешно конкурировать с линейным ускорителем.

Возможно, что в будущем в качестве инжектора в установке ВЭП-1 будет использован новый безжелезный ускоритель БСБ более простой и надежной конструкции. Этот ускоритель при том же радиусе орбиты будет иметь большую предельную энергию и такую интенсивность пучка, что одного импульса будет достаточно для заполнения сразу двух дорожек накопителя необходимым количеством электронов.

Описание обоих ускорителей дано в докладе, представленном на конференцию [11].

2. Накопительные дорожки

Накопительная установка представляет собой две круглые магнитные дорожки радиусом 43 см, круговые орбиты в которых касаются. Против точки касания в полюсах магнитов сделаны горизонтальные щели для вывода электронов, рассеянных в месте встречи пучков. Установка расположена таким образом, что медианная плоскость накопительных колец вертикальна и одно кольцо находится над другим. Это позволило разместить систему регистрации рассеянных электронов в горизонтальной плоскости вокруг накопительной установки.

В общей части дорожек (40° по азимуту) показатель магнитного поля $n = 0$. Значение n вне этой области выбирается таким образом, чтобы частоты бетатронных колебаний были далеки от опасных резонансных значений. По обе стороны области однородного поля имеются участки длиной 20° с $n = 1$; поле в остальной части дорожки имеет $n = 0,62$. Максимальная напряженность магнитного поля 10 кэ. Стабильность тока питания магнита 0,03%.

Форма электромагнитов грибообразная. Полюса составляют единое целое со стенками вакуумной камеры, выполненной из нержавеющей стали. Внутри нее крепятся полюсные наконечники, имеющие форму полуколец. Рабочая апертура камеры 50×35 мм.

Со всех торцовых сторон камера имеет большие прямоугольные отверстия, закрытые двойными фланцами. Внутреннее уплотнение — на свинце, наружное — на резине. Межфланцевое пространство откачивается дополнительными паромасляными насосами до давления $5 \cdot 10^{-6}$ тор. Основной насос сорбционного типа с титановым распылителем

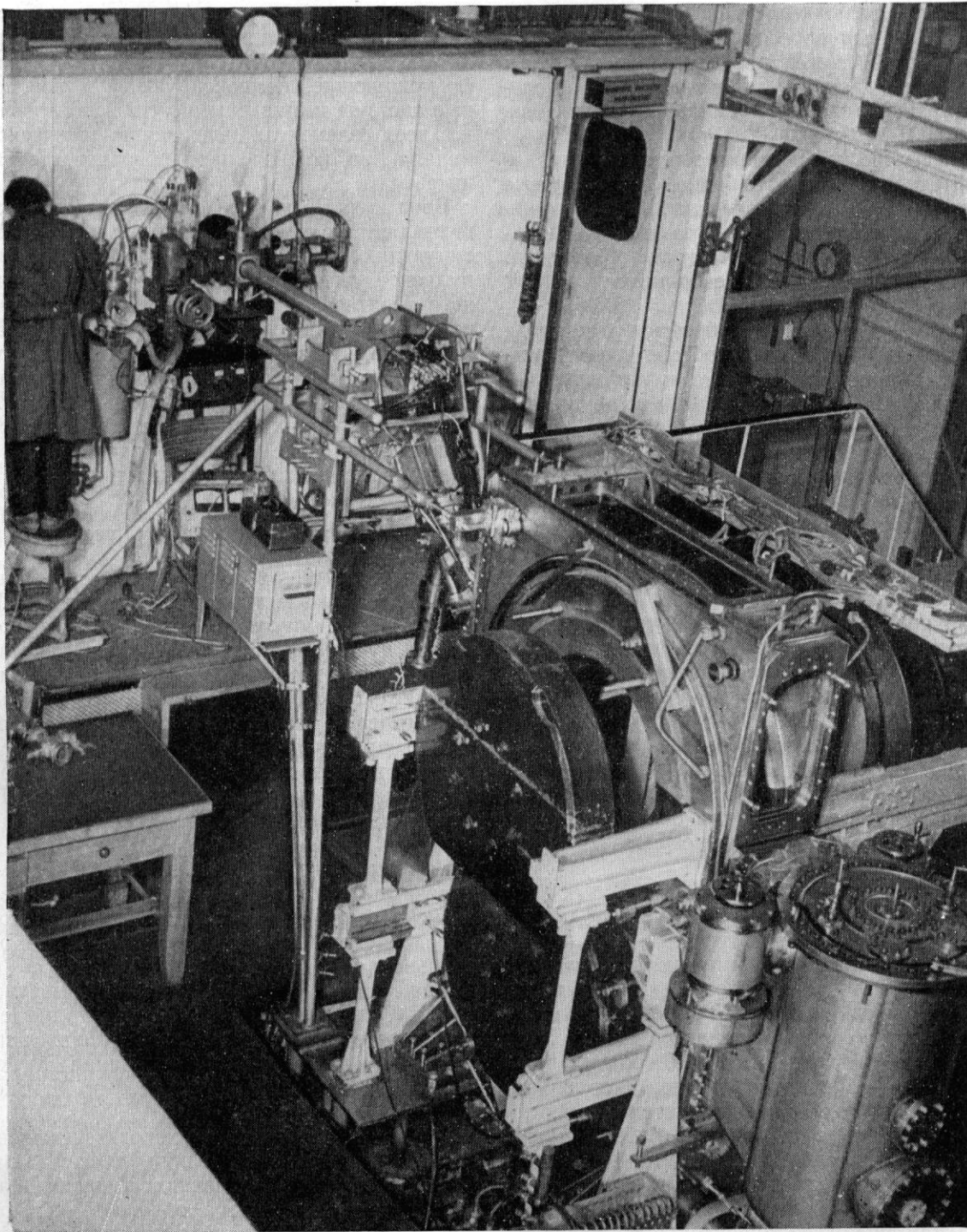


Рис. 2. Накопительные дорожки и часть электронно-оптического канала установки ВЭП-1. Синхротрон Б-2С находится за экраном слева.

и азотным охлаждением дает предельное давление 10^{-8} тор и обеспечивает скорость откачки $10\,000$ л/сек. В рабочем объеме камеры достигнуто давление $3 \cdot 10^{-8}$ тор. Для обеспечения такого вакуума камера прогревалась до 200°C .

В качестве ускоряющих элементов для накопительных колец выбраны коаксиальные четвертьволновые резонаторы. Для уменьшения их геометрических размеров используется 2-я гармоника частоты обращения. Вводы питания имеют электрическую длину, равную полуволне.

В момент инжекции выбранная амплитуда ВЧ-напряжения должна обеспечивать оптимальный режим захвата частиц в накопление. При энергии инжекции 50 Мэв величина амплитуды ВЧ-напряжения составляет 5 кв. В стационарном режиме, чтобы обеспечить большее время жизни пучка, амплитуда ВЧ-напряжения может подниматься до 15 кв. ВЧ-мощность генератора 2×6 квт.

Отклонение частоты от оптимальной приводит к радиальному смещению пучков и нарушению условий встречи. Это накладывает ограничения на допустимую нестабильность частоты ВЧ-напряжения. Необходимую стабильность ($0,01\%$) обеспечивает кварцованный задающий генератор.

Для компенсации возможных уходов фазы ВЧ-напряжения из-за разогрева резонаторов введены системы автоподстройки их резонансной частоты. Специальные фазосдвигающие линии, введенные в тракты обоих резонаторов, регулируют положение сгустков и место их встречи.

3. Электронно-оптический канал

Отклоненный с орбиты пучок выводится из камеры синхротрона с помощью магнитного канала, представляющего собой круглый железный экран, напряженность поля в котором близка к нулю. С помощью корректирующих магнитов (см. рис. 1) пучок направляется в квадрупольные линзы и затем в поворотный магнит секторного типа, обеспечивающий поворот пучка на 48° . Коммутирующий магнит поворачивает пучок дополнительно на $\pm 10^\circ$ и направляет его поочередно в верхнюю или нижнюю накопительную дорожку. Линзы образуют в поворотном магните промежуточный фокус, так что поворотный магнит оказывает на пучок лишь слабое фокусирующее действие. Расходящийся после пово-

ротного магнита пучок фокусируется снова квадрупольными линзами. Импульсный режим работы ускорителя позволяет делать фокусирующие, компенсирующие и поворотные системы импульсными, что использовано во всех элементах электронно-оптического канала, за исключением поворотного магнита.

Ввод пучка в накопительные дорожки осуществляется с помощью специальных компенсирующих систем, в которых создается импульсное магнитное поле, равное по величине и обратное по знаку полю накопительных дорожек. Компенсирующие системы представляют собой коаксиальную линию специальной формы, по которой проходит импульс тока порядка 10^5 а. Профилированием наружных и внутренних электродов удается скомпенсировать поле магнита накопителя во всей апертуре системы с точностью 1% .

4. Система вывода и ввода

Для инжекции в накопитель ускоренных в синхротроне электронов в установке ВЭП-1 используется импульсное однооборотное управление пучком. На равновесных орбитах синхротрона и накопителя расположены отклоняющие системы, питаемые от общего импульсного генератора. Время установления (возникновения и исчезновения) управляющего поля составляет менее половины периода обращения частиц по равновесным орбитам. Пучок смещается отклоняющими системами примерно на 2 см.

При прохождении отклоняющей системы вывода (дефлектора) в среднем около половины ускоренных электронов получает достаточно однородный по величине импульс в радиальном направлении и, отклонившись от равновесной орбиты, попадает в выводной канал. Отклоняющая система ввода (инфлектор) на первом обороте гасит возникшие при инжекции в накопитель колебания пучка. Эффективность захвата может быть близкой к 100% .

Дефлектор состоит из короткозамкнутых отрезков передающих линий и согласован по волновому сопротивлению с фидером. Магнитное поле дефлектора обладает достаточной однородностью в зоне движения управляемого пучка, благодаря чему поперечные размеры и угловая расходимость пучка при выводе остаются практически без изменений. Инфлектор представляет собой нагруженную

на волновое сопротивление линию, импульс напряжения в которой распространяется навстречу движению электронов. Поле (электрическое и магнитное) в инфлекторе неоднородное, примерно линейно возрастающее по радиусу. Амплитуда возбужденных импульсов бетатронных колебаний накопленного пучка оказывается не больше половины апертуры накопительного кольца.

Для питания отклоняющих систем разработан специальный генератор, основанный на применении быстродействующих перенапряженных разрядников, разрядные промежутки которых находятся в азоте под давлением 10—20 атм. Конструктивно разрядники являются частями присоединенных к ним передающих линий и согласованы с ними по волновому сопротивлению. На нагрузке 13 ом генератор формирует одиночные прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой до 100 кв, временем нарастания 1 нсек и длительностью 10 нсек. Генератор синхронизирован с запускающим импульсом с точностью до 0,3 мксек. Генератор питается от источника постоянного напряжения 150 кв. Колебания амплитуды импульса меньше $\pm 3\%$.

5. Первые опыты по накоплению

В настоящее время на установке ВЭП-1 начались эксперименты по накоплению электронов на одну дорожку. Пучок электронов с энергией 40 Мэв выведен из синхротрона, проведен без потерь по электронно-оптическому каналу и введен в накопитель. За один цикл инжекции удается захватить в синхротронный режим до 100 ма электронного тока. Следующие импульсы инфлектора не выбивают накопленный пучок с дорожки. Работа ведется при вакууме порядка 10^{-7} тор. Время жизни пучка составляет 140 сек. Эта величина хорошо согласуется с расчетом, учитывающим процессы однократного взаимодействия электронов с атомами остаточного газа — кулоновское рассеяние на ядрах, образование δ -электронов и тормозное излучение. Большое время жизни пучка позволяет не связывать рабочую энергию накопителя с энергией инжекции и накопления. Нужная рабочая энергия устанавливается увеличением магнитного поля дорожек после накопления. Возможность такого режима работы подтверждена экспериментально: энергия пучка электронов в накопителе поднималась до 140 Мэв без снижения его интен-

сивности, время жизни электронов увеличилось до 10 мин.

При большом значении накопленного тока время жизни пучка уменьшается из-за эффекта рассеяния электронов на электронах внутри сгустка, вызывающего релятивистский переход небольшой поперечной составляющей импульса в большой продольный разброс [12]. В рассматриваемых условиях вклад этого эффекта во время жизни пучка становится заметным при токе порядка 100 ма. Для получения токов порядка 1 а без существенного сокращения времени жизни пучка достаточно увеличить его радиальный размер до величины 1 см. Это можно сделать, подавая на инфлекторные электроды импульсы, раскачивающие пучок с частотой повторения, превышающей величину, обратную времени затухания бетатронных колебаний. Рациональность этой операции следует из того, что время жизни растет как квадрат радиального (наибольшего поперечного) размера пучка, в то время как число актов взаимодействия (основной эффект) падает как первая степень.

Программа дальнейших работ предусматривает увеличение времени жизни пучка в три раза за счет улучшения вакуума и повышения частоты повторения циклов ускорения до одного раза в 10 сек. При скорости накопления электронов около 100 ма (примерно $5 \cdot 10^9$ частиц) за один цикл ускорения это обеспечит возможность накопления токов порядка 1 а на каждую дорожку.

6. Постановка эксперимента

В первом эксперименте на встречных электрон-электронных пучках должно измеряться угловое распределение упругого рассеяния электронов на электронах.

Регистрирующая аппаратура состоит из пар сцинтилляционных счетчиков, включенных в схему совпадений, с разрешающим временем $2\tau = 10$ нсек. В счетчиках используются временные фотоумножители ФЭУ-33 и пластмассовые сцинтилляторы диаметром 60 и 90 мм и толщиной 15 мм. Эффективный телесный угол одного канала регистрации — около 10^{-3} стерад.

Конечные размеры области взаимодействия накладывают определенные требования на размеры детекторов [13]. Эффективная длина области взаимодействия зависит от угла, под которым стоят два счетчика, включенные в схему совпадений и регистрирующие рас-

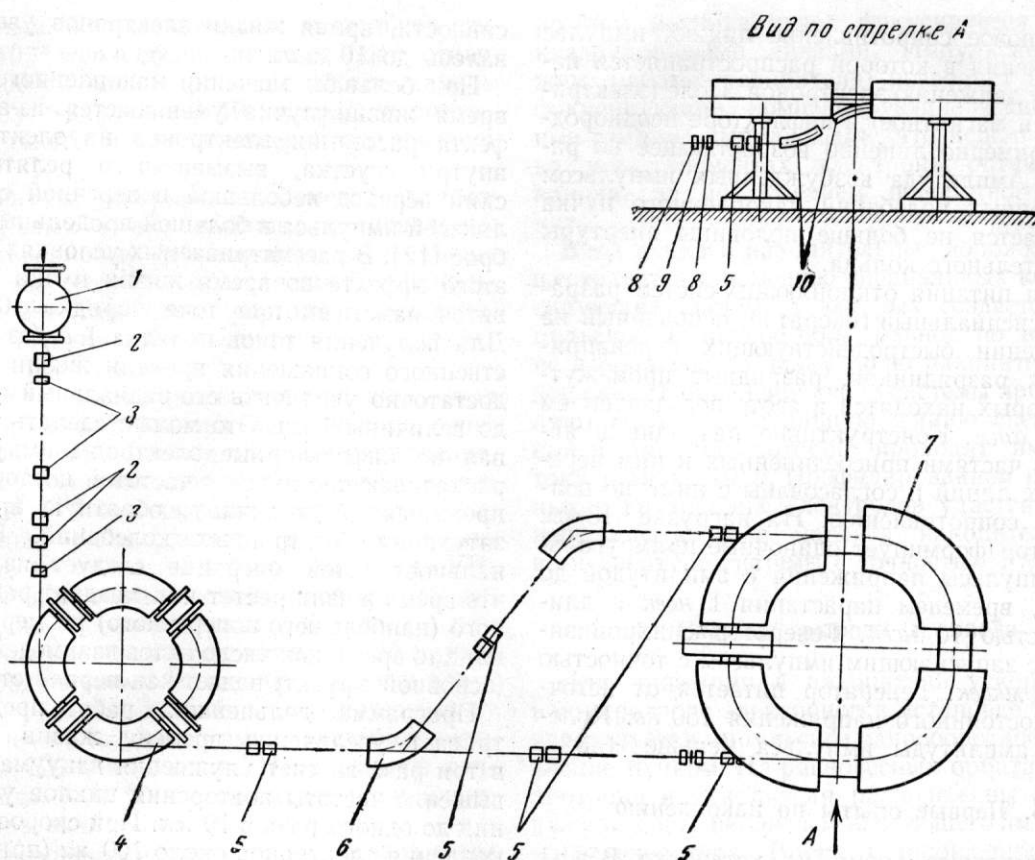


Рис. 3. Общая схема установки ВЭПП-2:

1 — амплитудный ускоритель; 2 — корректирующие линзы; 3 — цилиндрические линзы; 4 — синхротрон Б-3М; 5 — квадрупольные линзы; 6 — поворотный магнит; 7 — накопительная дорожка; 8 — параболические линзы; 9 — конвертор; 10 — система параллельного переноса пучка.

сеянные электроны. Если связанная с этим ошибка не должна превышать 3%, то для принятых размеров детекторов эффективная длина области взаимодействия должна быть не больше 2 см.

Ожидаемые в эксперименте скорость счета и отношение эффект — фон зависят от многих параметров установки, недостаточно точно определенных до ее запуска. Поэтому в настоящее время можно провести лишь приближенные оценки условий эксперимента. Предполагаемый режим работы установки при энергии 100 Мэв позволяет, установив десять пар счетчиков под углом, близким к 90°, и по одной паре под углом 30 и 150°, иметь скорость счета для угла рассеяния 90° около одного отсчета в минуту и для угла 30° — около пяти отсчетов в минуту. Ожидаемое отношение эффект/фон — порядка 100.

II. ВСТРЕЧНЫЕ ПОЗИТРОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

Работа по встречным позитрон-электронным пучкам предполагает постановку экспериментов для изучения взаимодействия позитронов и электронов с энергиями до 2×700 Мэв.

В эксперименте с электрон-электронными пучками двум частицам в конечном состоянии соответствует лишь меллеровское рассеяние. Все другие процессы по крайней мере на два порядка менее вероятны, и их изучение из-за сложной кинематической картины значительно труднее. В случае встречных позитрон-электронных пучков исходная система по заряду нейтральна и, следовательно, возможны многие другие процессы с двухчастичным конечным состоянием. Эксперименты по

изучению этих процессов дадут значительно более обширную и ценную информацию о взаимодействии элементарных частиц.

Установка со встречными позитрон-электронными пучками ВЭПП-2 (рис. 3) состоит из сильноточного электронного синхротрона Б-3М, высоковакуумной магнитной дорожки, конвертора для преобразования электронного пучка в позитронный, электронно-оптической системы проводки пучка и системы однооборотного вывода пучка из ускорителя и ввода в накопительную дорожку.

1. Ускоритель-инжектор

В качестве ускорителя-инжектора используется разработанный в институте сильноточный синхротрон Б-3М с внешней инжекцией от так называемого амплитудного ускорителя и однооборотной системой вывода [11, 14].

Предполагаемые параметры синхротрона Б-3М: энергия — до 350 Мэв; длительность

импульса тока в выпущенном пучке — около 20 нсек; импульсный ток — до 10 а (больше 10^{12} электронов в импульсе); частота повторения циклов ускорения — до 12 гц. Этот синхротрон даже по среднему току (несколько микроампер) может конкурировать с линейным ускорителем. Необходимость в таком мощном пучке вызвана большой потерей интенсивности при трансформации электронов в позитроны.

2. Накопительная дорожка

Накопительная установка (рис. 4) представляет собой слабофокусирующий рейстрек с четырьмя одинаковыми прямолинейными промежутками. Два промежутка используются для инжекции электронов и позитронов, в третьем расположен ВЧ-резонатор, а промежуток напротив предназначен для проведения экспериментов.

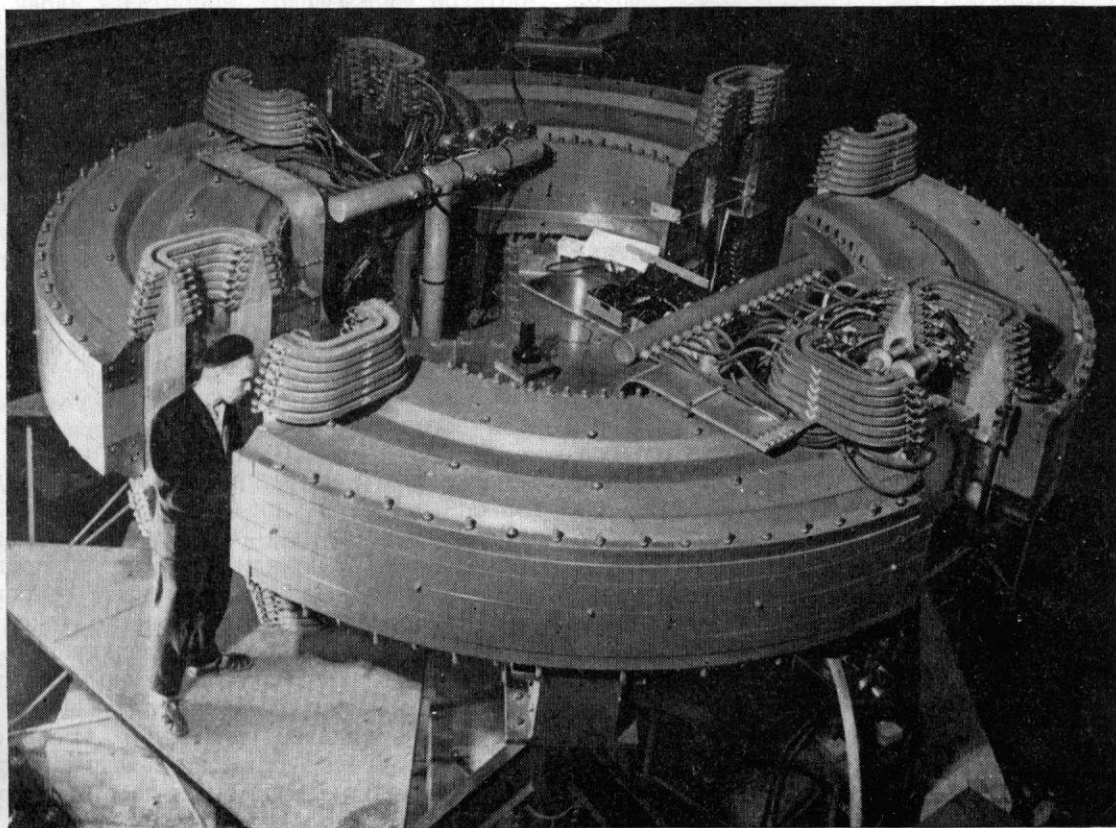


Рис. 4. Общий вид накопителя.

Квадранты сконструированы в виде электромагнитов закрытого типа. Наклон поверхности полюсов к горизонтали составляет $3^{\circ}35'$ и продолжается в область, занятую обмотками, что обеспечивает значение $n = 0,6$ с точностью $\pm 2\%$ во всем межполюсном зазоре. Максимальная напряженность магнитного поля на равновесной орбите составляет 15 кэ ; нестабильность тока питания магнита $0,03\%$.

Полюса магнита и латунные обечайки образуют внешнюю вакуумную камеру. Ее соединения уплотняются резиновыми прокладками. Откачка наружной камеры ведется двумя паромасляными насосами.

Внутренняя камера имеет форму тора прямоугольного сечения $160 \times 135 \text{ мм}$ и изготовлена из меди. В ней используются уплотнения канавочно-клинового типа с медной прокладкой. Камера прогревается до 400°С . На испытательном стенде при помощи паромасляного насоса с азотной ловушкой специальной конструкции в рабочем объеме камеры было получено давление $5 \cdot 10^{-10} \text{ тор}$.

Резонатор накопителя работает на 1-й гармонике частоты обращения частиц, равной 25 Мгц . Он состоит из двух четвертьволновых коаксиальных линий, нагруженных конденсатором из двух дисков, и имеет добротность около 3000. Для возбуждения резонатора используется генератор мощностью 250 квт . Предполагается в дальнейшем увеличить эту мощность до 750 квт , установив дополнительный каскад, что даст возможность получать на нагруженном пучком резонаторе напряжение до 300 кв .

3. Электронно-оптический канал

Выходящий из синхротрона электронный пучок с помощью системы квадрупольных линз и поворотных магнитов (см. рис. 3) направляется либо непосредственно в камеру накопителя, либо на электрон-позитронный конвертор. В последнем случае первый поворотный магнит выключен.

Конвертор представляет собой вольфрамовую пластинку толщиной около одной радиационной единицы. Для того чтобы при конвертировании существенно не увеличивался фазовый объем пучка, конвертор располагается в фокальной плоскости двух короткофокусных линз. При достаточно большой их светосиле такая система обеспечит захват в накопитель большей части позитронов того

энергетического интервала, который удовлетворяет условиям захвата. Ширина этого интервала — $1,5\%$ от энергии инжекции. Выбирая энергию позитронов равной половине энергии электронов, можно получить коэффициент конверсии $3 \cdot 10^{-4}$.

В качестве короткофокусных линз предполагается использовать магнитные линзы, которые могут быть названы параболическими.

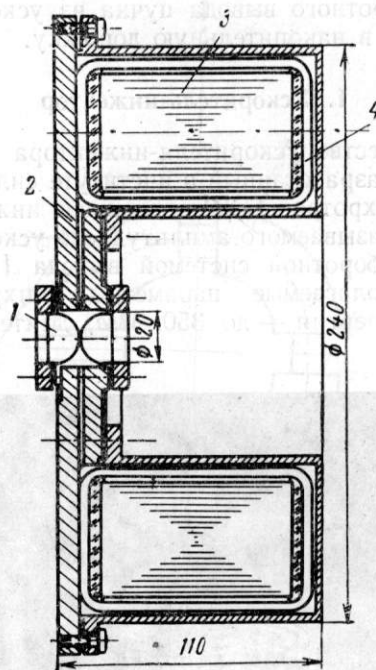


Рис. 5. Параболическая линза: 1 — параболические электроды линзы; 2 — токоподводы; 3 — сердечник токового трансформатора; 4 — первичная обмотка трансформатора.

Такая линза (рис. 5) представляет собой два параболоида вращения из алюминия (или бериллия) толщиной $0,1-0,2 \text{ мм}$, соединенных вершинами. Ток порядка 10^5 а длительностью около 1 мксек подводится к линзе с помощью симметричного малоиндукционного токопровода, так что в пространстве между параболоидами создается аксиально симметричное импульсное магнитное поле, спадающее в поперечном направлении как $1/r$. Если ось пучка направлена вдоль оси симметрии линзы, то заряженная частица будет проходить путь в магнитном поле, пропорциональный r^2 . Таким образом, интеграл от поля по траектории растет линейно с расстоянием от оси,

что обеспечивает линейную фокусировку пучка.

Ввод пучка в накопительные дорожки осуществляется в вертикальной плоскости, поэтому медианные плоскости ускорителя и накопителя разнесены по вертикали на 68 см. Пучок вводится при помощи импульсных безжелезных магнитов с толщиной проводящих поверхностей, формирующих поле, большей толщины скин-слоя.

4. Система вывода и ввода

Однооборотные вывод электронов из ускорителя и ввод электронов и позитронов в магнитную дорожку осуществляются с помощью электромагнитных систем дефлектора и двух инфлекторов (без ферритов), питаемых от специальных синхронизованных высоковольтных генераторов наносекундных импульсов. Все генераторы имеют парафазный выход.

Дефлектор сконструирован как отрезок короткозамкнутой плоской линии с разрезом для ввода электронов. Инфлекторы позитронов и электронов расположены каждый во втором квадранте от места ввода. Инфлекторы представляют собой медные пластины, размещающиеся вдоль всего магнитного квадранта над и под пучком. Волна напряжения в инфлекторе распространяется навстречу движению частиц, что позволяет производить инжекцию одного пучка без возмущения пучка другого заряда. Волновое сопротивление каждой пластины инфлектора составляет 10 ом. Амплитуда напряжения на каждой пластине — до 50 кв.

В настоящее время создана модель генератора высоковольтных импульсов на основе трехэлектродного последовательного разрядника с тиратронным запуском, работающего в атмосфере азота под давлением 25 атм. Параметры генератора: частота повторения импульсов — до 25 гц, амплитуда напряжения на 50-омной нагрузке 25 кв; длительность импульса 30 нсек; длительность фронта и точность синхронизации с внешним запуском 1 нсек.

5. Предполагаемый режим работы

Накопление позитронов предполагается проводить при энергии 150 Мэв. Этой энергии и вакууму 10^{-9} тор соответствует парциальное время жизни пучка по однократным процессам взаимодействия с остаточным газом

около $3 \cdot 10^4$ сек. Для того чтобы эффект рассеяния позитронов на позитронах внутри сгустка существенно не уменьшал времени жизни, необходимо искусственно поддерживать большие поперечные размеры пучка. Можно показать, что размер пучка 1×3 см позволит накопить ток больше 1 а.

Предполагаемая скорость накопления позитронов — около 1 ма (примерно $3 \cdot 10^8$ частиц) за один цикл ускорения. Время затухания бетатронных колебаний позволяет при энергии инжекции 150 Мэв работать с частотой повторения 3 гц. В этих условиях ток 1 а будет накапливаться за 300 сек. Два порядка запаса во времени жизни (или в скорости накопления) помогут преодолеть возможные трудности.

6. Постановка эксперимента

На рис. 6 показаны энергетические (для угла 90°) и угловые (для энергии 300 Мэв) зависимости сечений нескольких процессов в позитрон-электронном взаимодействии. Вычисления сделаны в низшем порядке теории возмущений в предположении справедливости законов квантовой электродинамики на малых расстояниях.

Трудности контроля параметров области взаимодействия двух пучков сильно снижают точность измерения абсолютной величины сечений, поэтому предметом измерения будет их относительный энергетический ход и угловые распределения.

По-видимому, самым легким для регистрации, а следовательно, и наиболее удобным для использования в качестве монитора будет процесс двухквантовой аннигиляции с разлетом γ -квантов по линии, близкой к линии встречи. Для этого эффекта при энергии 150 Мэв, площади поперечного сечения пучков 3 см² (условия накопления) и токе каждого пучка 1 а счетчик с угловым размером 1° будет иметь скорость счета порядка 10 отсчетов в минуту. Для обеспечения такой скорости счета при измерении упругого рассеяния и двухквантовой аннигиляции под углом 90° к линии встречи необходимо иметь эффективный телесный угол регистрации около 1 стерад.

С повышением энергии эффект рассеяния частиц внутри сгустка ослабляется и поперечные размеры пучка можно уменьшить, сохраняя время жизни больше 10^4 сек. Это позволяет увеличить скорость счета, несмо-

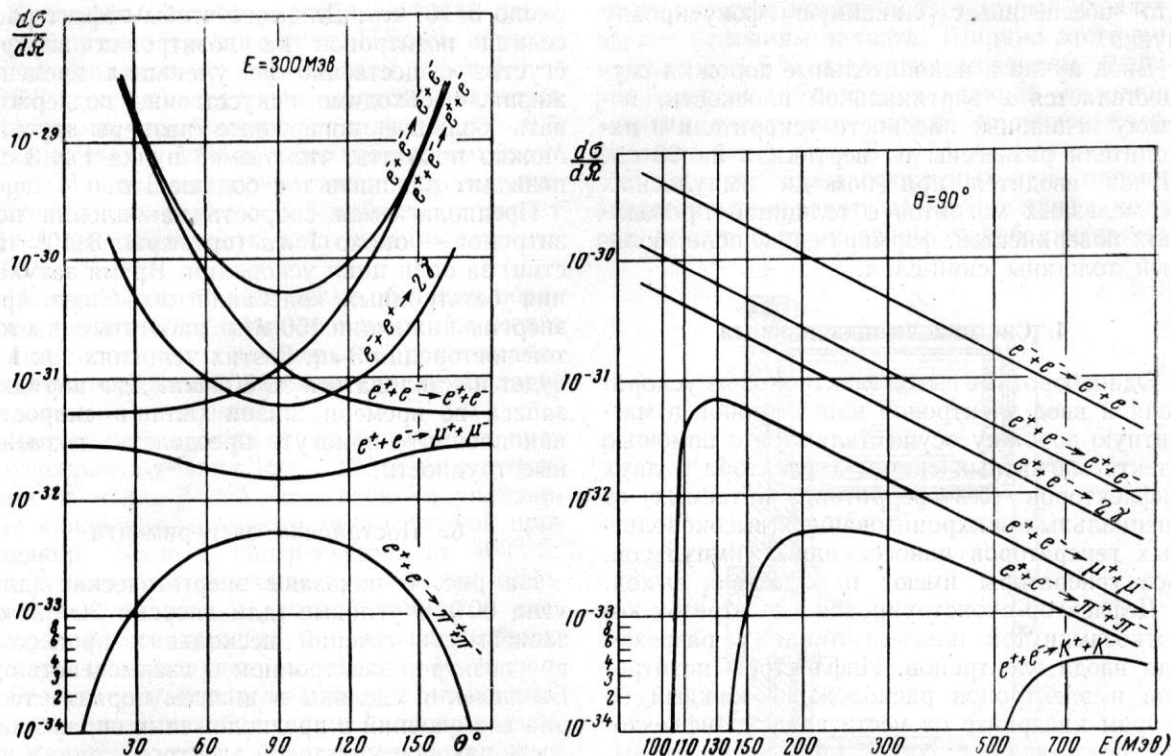


Рис. 6. Энергетические и угловые зависимости меллеровского сечения и сечений процессов при электрон-позитронном взаимодействии.

тря на то что с ростом энергии сечения всех процессов падают. При энергии 700 МэВ поперечные размеры пучка можно уменьшить до $0,1 \times 10 \text{ мм}$, что близко к его естественным размерам. В этих условиях телесному углу 1 стерад и скорости счета порядка 10 отсчетов в минуту будет соответствовать регистрация более редких событий, таких, как $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ и $e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Будет наблюдаться также процесс $e^+ + e^- \rightarrow K^+ + K^-$ со скоростью счета около трех отсчетов в минуту.

Для проведения экспериментов с позитрон-электронными пучками разрабатывается система искровых камер с акустическим выводом информации. Высокое геометрическое разрешение искровых камер позволит лучше учесть погрешности измерений, связанные с конечными размерами области взаимодействия, радиационными эффектами и фоном. Акустическая система вывода информации дает возможность даже первичную обработку результатов измерений проводить на электронно-счетной машине.

III. ВСТРЕЧНЫЕ ПРОТОН-ПРОТОННЫЕ ПУЧКИ

С использованием принципа встречных пучков значительно уменьшается вес ускорителя, предназначенного для постановки экспериментов с заданной относительной энергией, но этот тип ускорителя не может полностью заменить обычный ускоритель на соответствующую относительную энергию, поскольку последний служит генератором вторичных частиц высоких энергий. Однако для протон-протонных экспериментов ускоритель со встречными пучками имеет преимущество перед обычным, поскольку углы разлета вторичных частиц малы даже в системе центра инерции, а в лабораторной системе из-за релятивистского сжатия во многих случаях практически не могут быть измерены. Кроме того, все вторичные частицы в обычном ускорителе являются крайне релятивистскими и потому трудно различимы.

Второй способ снижения веса ускорителя — использование магнитных полей большой на-

пряженности. Можно считать, что практический предел амплитуды магнитного поля в безжелезных ускорителях достигается при 200 кгс. Такое поле создает давление 1600 атм. Трудно представить себе в настоящее время рациональные конструкции, в которых можно было бы получить существенно большие поля с точностью, необходимой для ускорения.

Наша разработка протон-протонной установки объединяет принцип встречных пучков и использование больших магнитных полей.

1. Схема установки

Установка представляет собой одновитковый импульсный безжелезный протонный синхротрон со слабой фокусировкой и уравновешенной центральной шиной, в котором одновременно ускоряются протоны во встречных

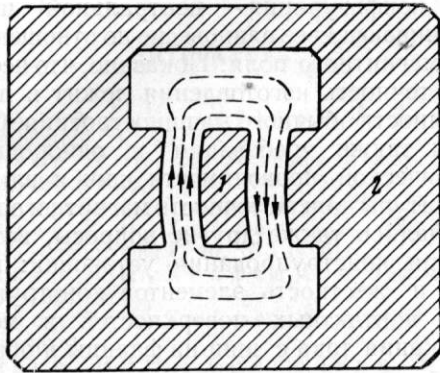


Рис. 7. Поперечное сечение камеры и магнита протон-протонной установки. Показаны силовые линии магнитного поля (1 — центральная уравновешенная шина; 2 — внешняя шина — корпус).

направлениях. Радиус равновесной орбиты 2 м, магнитное поле около 200 кгс; это соответствует энергии каждого пучка 12 Гэв и относительной энергии около 300 Гэв.

Сечение камеры и магнита показано на рис. 7. Импульсный ток, текущий по центральной шине, возвращается по корпусу, который одновременно является вакуумной камерой. Силовые линии магнитного поля показаны пунктиром. Относительно магнитных усилий центральная шина в целом находится в устойчивом равновесии. Она, однако, достаточно прочно закреплена по конструктивным соображениям. Камера из-

готавливается из немагнитной стали из расчета на внутреннее давление магнитного поля. Вследствие скин-эффекта токи текут по поверхностям, и, таким образом, форма поля определяется формой поверхностей.

Установка в плане представляет собой несимметричный рейстрек с четырьмя промежутками (рис. 8). Направление тока в центральной шине в левой и правой половинах

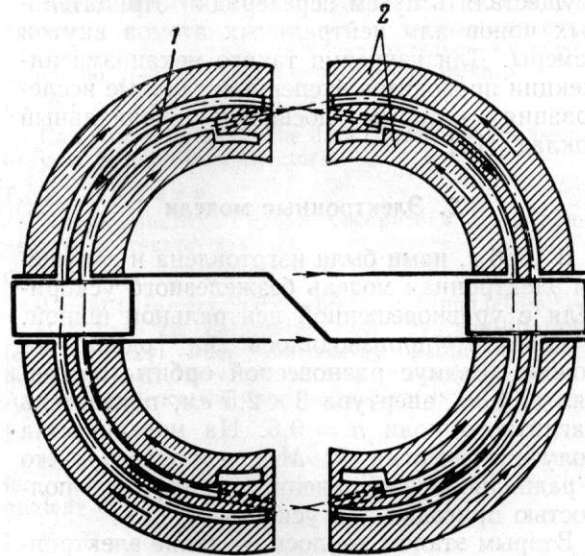


Рис. 8. Протон-протонная установка, вид в плане. Стрелками показаны направления токов (1 — центральная уравновешенная шина; 2 — внешняя шина — корпус).

противоположно. В верхнем и нижнем прямолинейном промежутке частицы переходят из внутренней дорожки в наружную и наоборот. Резонатор, установленный в левом или правом промежутке, ускоряет частицы в обоих направлениях и при работе на любой нечетной гармонике обеспечивает встречу сгустков в местах пересечения орбит.

В протон-протонной установке частицы сталкиваются на протяжении всего цикла ускорения, причем предельные энергии находятся в выигрышном положении, им соответствует вершина синусоиды питающего тока. Относительно малая длительность рабочего времени по сравнению с обычными ускорителями компенсируется большей плотностью пучка, связанной с малыми размерами установки. При прочих равных условиях (энергии инжекции, относительной апертуре и др.) плотность пучка здесь больше в отношении квадратов радиусов.

Чтобы получить хорошо наблюдаемый эффект при столкновении протонов, необходимо довести интенсивность пучка практически до предела, определяемого объемным зарядом при достаточно высокой энергии инжекции.

Оценки показывают, что при энергии инжекции 2 Мэв и сечении 1 мбарн можно получить несколько актов взаимодействия за один цикл ускорения. Инжекцию предполагается осуществлять путем перезарядки отрицательных ионов или нейтральных атомов внутри камеры. Для изучения такого механизма инжекции проводятся экспериментальные исследования, которым посвящен специальный доклад [15].

2. Электронные модели

В 1956 г. нами была изготовлена и запущена электронная модель безжелезного ускорителя с уравнивающей центральной шиной. Ускорение производилось на одной дорожке. Радиус равновесной орбиты составлял $17,4 \text{ см}$, апертура $3 \times 2,5 \text{ см}$, показатель магнитного поля $n = 0,6$. На модели была получена энергия 70 Мэв и показано, что в радиальном направлении вся дорожка полностью пригодна для ускорения.

Вторым этапом явилось создание электронного синхротрона с радиусом орбиты 23 см на энергию 1 Гэв . В настоящее время сооружение и монтаж ускорителя закончены; ведутся наладочные работы. В отдельном квадранте ускорителя получено поле 130 кгс требуемой конфигурации с необходимой для ускорения точностью.

3. Разработка магнитной системы

Возможность создания протон-протонной установки в значительной степени определяется успехом разработки системы питания магнита — ударного генератора на 250 Мдж с временем вложения энергии в магнит $0,02 \text{ сек}$. В связи с трудностями этой задачи и в целях более тщательной отработки элементов установки предполагается предварительно построить ускоритель с пониженными параметрами (радиус орбиты $1,3 \text{ м}$, напряженность магнитного поля порядка 100 кэ , что соответствует энергии пучков около 3 Гэв и относительной энергии 30 Гэв). В настоящее время ведется его проектирование.

Исследование устойчивости движения частиц в асимметричном рейстреке показало,

что по сравнению с обычным случаем расширяются запретные резонансные зоны и появляется некоторая азимутальная асимметрия в огибающих траекторий движения.

Разность радиусов кривизны орбиты на внутренней и наружной дорожках компенсируется разностью их магнитных полей. В выбранном варианте это обеспечивается равенством ширины обеих дорожек, сохраняющимся даже к концу цикла ускорения, когда ширина каждой дорожки для магнитного потока увеличивается на некоторую (одинаковую) величину вследствие проникновения магнитного поля в металл шин.

Все размеры магнитопровода подбираются на моделях из условия равенства магнитных сопротивлений во всех сечениях в каждый момент времени. Эта задача осложняется тем, что величина магнитного сопротивления существенно меняется за время ускорения. Подобрана конфигурация центральной шины, обеспечивающая ее равновесие по отношению к силам магнитного поля. Показано, что необходимая точность изготовления лежит в пределах точности обычного машиностроения. Определены также требования к однородности электрической проводимости шин и влияние температуры шин на точность магнитного поля.

Изучались также другие вопросы, возникшие при конструировании установки: прочность и жесткость элементов конструкции, выбор контактных поверхностей в местах перетекания тока с шин на фланцы и обратно и т. д.

4. Разработка системы питания

ВЧ-питание импульсного безжелезного ускорителя намного сложнее обычного, поскольку при значительно большей мощности требуется более высокая частота и изменение ее происходит за более короткое время. Несмотря на то что общий запас энергии магнитного поля при заданной энергии частиц уменьшается обратно пропорционально напряженности поля, система электропитания безжелезных магнитов тоже оказывается сложнее, так как эту энергию необходимо вложить за более короткое время. При энергии магнитного поля выше 10 Мдж необходимы специальные разработки, так как использование конденсаторов в данном случае становится экономически нерациональным. Решение этих двух задач облегчается ввиду импульсной работы ускорителя с большой скважностью.

Для ускорения частиц предполагается использовать резонансный контур с переменной собственной резонансной частотой. Перестройка контура производится с помощью намагничивания ферритового сердечника индуктивности контура. Для обеспечения перестройки частоты за короткое время был разработан специальный феррит, позволяющий получить высокие скорости перестройки частоты без потери добротности. Макет резонатора способен развивать напряжение на ускоряющем промежутке до 20 кВ и позволяет ускорять частицы при девятикратном изменении частоты их обращения. Питание резонатора осуществляется с помощью широкополосного усилителя с выходной мощностью более 100 кВт.

Для электропитания магнита в настоящее время разрабатывается ударный генератор, основанный на резком торможении вращающихся масс в магнитном поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г. И., Наумов А. А. CERN Symposium, 1, 76 (1956).
2. Байер В. Н. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 37, 1490 (1959).
3. Байер В. Н. «Усп. физ. наук», 78, 619 (1962).
4. Байер В. Н., Хейфец С. А. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 40, 613 (1961).
5. Байер В. Н., Хейфец С. А. Там же, 40, 715 (1961).
6. Байер В. Н., Хейфец С. А. Nucl. Phys. (в печати).
7. Байер В. Н., Хриплович И. Б. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 39, 1374 (1960).
8. Сынах В. С. Там же, 40, 194 (1961).
9. Байер В. Н., Соколов В. В. Там же, 40, 1233 (1961).
10. Байер В. Н., Сынах В. С. Там же, 41, 1576 (1961).
11. Абрамян Е. Л., Бендер И. Е., Бондаренко Л. Н., Будкер Г. И., Глаголев Г. Б. и др. См. наст. сб., стр. 1065.
12. Вернардینی С. et al. Phys. Rev. Lett., 10, 407 (1963).
13. Ерозолимский Б. Г. и др. «Приборы и техника эксперимента» (в печати).
14. Гриц Ю. А., Иремашвили Д. В.,

- Наумов А. А., Острейко Г. Н., Панасюк В. С. и др. См. наст. сб., стр. 1080.
15. Будкер Г. И., Димов Г. И. См. наст. сб., стр. 993.

ДИСКУССИЯ

DISCUSSION

C. V e r n a r d i n i

How do you measure the stored intensity?

Г. И. Будкер

Интенсивность пучка измерялась по синхротронному излучению с помощью фотоумножителя. Сигнал с фотоумножителя предварительно калибровался по току с помощью пояса Роговского.

C. V e r n a r d i n i

Can you write down the data concerning the beam of your synchrotron-injector?

Г. И. Будкер

Характеристики пучка ускорителя Б2-С приведены в тексте доклада.

C. V e r n a r d i n i

I want to remark that 2γ bremsstrahlung ($e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^- + 2\gamma$) dominates over 2γ annihilation ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) when the energy resolution of γ detectors is of the order of 20% (around 500 MeV). As a consequence the monitor problem is not so easy.

F. A m m a n

How will it be obtained, in your storage ring for electrons and positrons, the vertical height quoted?

Г. И. Будкер

В установке ВЭПП-2 мы собираемся увеличить размеры пучка, непрерывно раскачивая его электрическим полем инфлектора.

И. Б. Енчевич

Делали ли вы сравнительную оценку стоимости предложенных ускорителей при заданной энергии в системе центра масс?

Г. И. Будкер

Эквивалентный ускоритель для электронов вообще не обсуждается, поскольку он имел бы диаметр порядка диаметра Земли. Речь может идти только о протонных ускорителях.

Что такое обыкновенный ускоритель на энергию 300 Гэв, можно себе представить. Безжелезный же ускоритель со встречными пучками имеет радиус всего 2 м. Разумеется, создание такого ускорителя связано с техническими трудностями, которые, однако, не измеряются рублями или долларами.

ПРИМЕР СТОХАСТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Б. В. Чириков

Институт ядерной физики СО АН СССР

Цель настоящего сообщения — еще раз обратить внимание на специфический вид неустойчивости нелинейной системы — так называемую стохастическую неустойчивость. Этот тип неустойчивости следует иметь в виду, в частности, при разработке так называемых нелинейных ускорителей, которым в последнее время уделяется значительное внимание.

В работе приводятся некоторые результаты численного расчета колебаний нелинейного осциллятора без затухания под действием внешнего периодического возмущения. Движение осциллятора описывается точной системой разностных уравнений:

$$\omega_{n+1} = \omega_n - \varepsilon \omega_n \operatorname{sign}(\psi_n - 1/2), \quad (1)$$

$$\psi_{n+1} = \left\{ \psi_n + \omega_{n+1} + \frac{\varepsilon}{4} - \varepsilon |\psi_n - 1/2| \right\}.$$

Уравнения получились разностными вследствие того, что внешнее возмущение выбрано в виде очень коротких толчков, относительная величина которых характеризуется параметром ε . Сведение дифференциальных уравнений к разностным дает возможность уменьшить ошибки счета до минимума, определяе-

мого ошибками округления, что оказывается существенным при исследовании поведения осциллятора в течение больших промежутков времени.

В системе уравнений (1) $\omega(\omega)$ — частота, характеризующая в силу нелинейности энергию осциллятора; ψ — фаза колебаний, имеющая период 1; индекс n — номер толчка; скобки $\{ \}$ означают дробную часть аргумента.

Результаты интегрирования системы (1) приведены на рисунке для двух значений характерного параметра $\varepsilon \omega$. При $\varepsilon \omega \ll 1$ и $\omega_0 - k \ll 1$ ($k \neq 0$, целое) разностные уравнения могут быть приближенно заменены дифференциальными [1]:

$$\left. \begin{aligned} \omega' &\approx -\varepsilon \omega v(\psi), \\ \psi' &\approx \omega - k, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

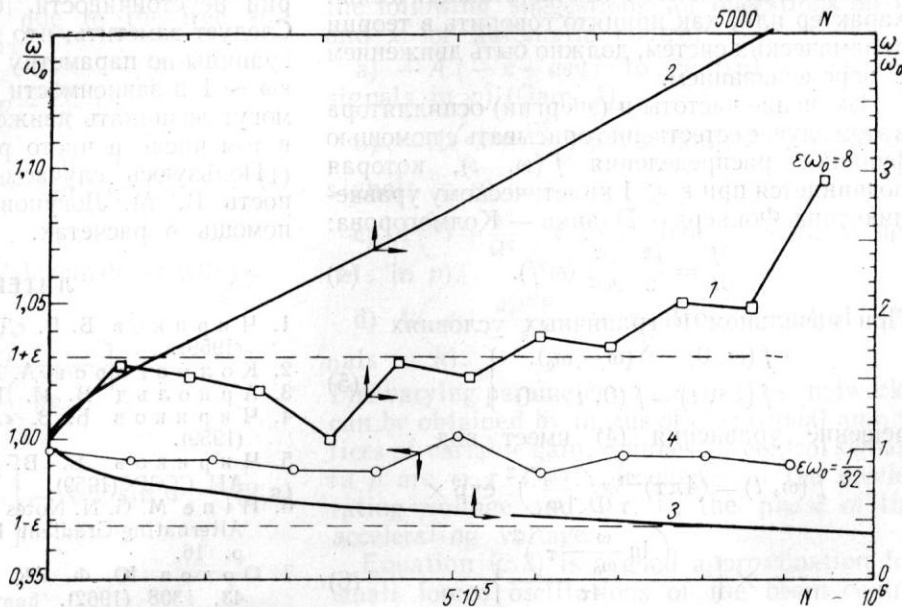
где $v(\psi)$ — ступенчатая функция с единичной амплитудой, а дифференцирование производится по n . Система (2) преобразуется к фазовому уравнению

$$\psi'' + \varepsilon \omega v(\psi) \approx 0, \quad (3)$$

из которого видно, что частота (и энергия) осциллятора совершает ограниченные в рас-

Пример стохастической неустойчивости нелинейных колебаний:

$\omega(\omega)$ — частота нелинейного осциллятора, зависящая от его энергии; N — число колебаний осциллятора; 1 — движение осциллятора при $\omega_0 = 64$; $\varepsilon = 1/8$; $\psi_0 = 1/4$; 2, 3 — среднее изменение частоты при стохастическом движении; 4 — движение осциллятора при $\omega_0 = 1$; $\varepsilon = 1/32$; $\psi_0 = 1/4$. Штриховая линия — величина одиночного толчка в последнем случае (нижняя шкала N относится к кривым 1 и 4, верхняя — к кривым 2, 3).



№ варианта	ω_0	ε	$\varepsilon\omega_0$	N	η	$\bar{\eta}^2 T^{1/2}$	$\bar{\xi}$	$(\bar{\xi}^2)^{1/2}$	$(\bar{\xi}^2)_T^{1/2}$	$\bar{\psi} - \frac{1}{2}$	$[(\Delta\psi)^2]_T^{1/2}$	Число случаев	
1	64	1/8	8	500	+0,17	0,11	+0,41	5,7	0,63	—	—	11	
2	64	1/8	8	1000	+0,17	0,23	-0,49	0,67	1,20	—	—	5	
3	7000	0,01	70	$3,5 \cdot 10^6$	}	-0,08	0,04	-0,22	3,4	0,74	0,01	0,05	40
4	7000	0,01	70	$7 \cdot 10^6$									

Примечание. $\eta = \frac{\bar{\omega}}{\bar{\omega}_T} - 1$; $\eta_T = 0$; $\xi = \frac{(\Delta\omega)^2}{(\Delta\omega)_T^2} - 1$; $\bar{\xi}_T = 0$; $\Delta\omega = \omega - \bar{\omega}_T$; $\Delta\psi = \psi - 1/2$. Индекс «Т» указывает на теоретическое значение. Величины без индекса получены в результате численного счета.

смаатриваемом приближении так называемые фазовые колебания с частотой и амплитудой $\sim \sqrt{\varepsilon\omega}$. Вопрос о строгой (при $t \rightarrow \infty$) ограниченности решения точной системы (1) при $\varepsilon\omega \ll 1$ весьма сложен. Из других работ [2, 3] можно сделать такой вывод, однако это строго не доказано. Результаты настоящего расчета также подтверждают данный вывод. На рисунке отложены значения частоты осциллятора, усредненные по фазовым колебаниям (кривая 4). На протяжении почти миллиона колебаний никакой тенденции к систематическому изменению не наблюдается, а колебания не превосходят 1%.

Совсем другой характер носит движение при $\varepsilon\omega \gg 1$ (кривая 1). Всего за 500 колебаний частота изменяется почти в три раза, хотя относительная интенсивность толчков (в пересчете на одно колебание) здесь в 16 раз меньше, чем в предыдущем случае. Согласно соображениям, высказанным раньше [4, 5], движение должно носить в этом случае стохастический характер или, как принято говорить в теории динамических систем, должно быть движением с перемешиванием.

Изменение частоты и (энергии) осциллятора в этом случае естественно описывать с помощью функции распределения $f(\omega, t)$, которая подчиняется при $\varepsilon \ll 1$ кинетическому уравнению типа Фоккера—Планка—Колмогорова:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} (\omega^2 f). \quad (4)$$

При начальном и граничных условиях

$$\left. \begin{aligned} f(\omega, 0) &= \delta(\omega - \omega_0), \\ f(\infty, t) &= f(0, t) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

решение уравнения (4) имеет вид

$$f(\omega, t) = (4\pi\tau)^{-1/2} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \exp \times \left\{ - \frac{\left(\ln \frac{\omega}{\omega_0} - \tau \right)^2}{4\tau} \right\}. \quad (6)$$

Количественная оценка стохастичности движения производилась путем сравнения среднего значения частоты $\bar{\omega}$ и среднеквадратичного разброса $(\Delta\omega)^2 = (\omega - \bar{\omega}_0)^2$ по результатам расчета со значениями этих величин из распределения (6). Данные сравнения приведены ниже. Дополнительно представлены характеристики распределения фаз ψ_n , которое для стохастического движения должно быть равномерным.

Из результатов настоящей работы видно, что граница устойчивости соответствует $\varepsilon\omega \sim 1$. Таким образом, подтверждается общий критерий стохастичности, полученный ранее [4, 5]. По-видимому, впервые критерий неустойчивости такого типа был получен еще в 1953 г. [6] в результате численных расчетов, однако, насколько нам известно, исследование обнаруженной неустойчивости не производилось и связь ее со стохастичностью не рассматривалась. В наших обозначениях критерий неустойчивости [6] имеет вид $\varepsilon\omega > \pi$. Следует заметить, что в общем случае резкой границы по параметру $\varepsilon\omega$ не существует. При $\varepsilon\omega \sim 1$ в зависимости от начальных условий могут возникать движения различных типов, в том числе и чисто резонансные [5].

Пользуюсь случаем выразить благодарность В. М. Логунову и В. С. Сынаху за помощь в расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чириков Б. В. «Докл. АН СССР», 125, 1015 (1959).
2. Колмогоров А. Н. Там же, 98, 527 (1954).
3. Арнольд В. И. Там же, 137, 255 (1961).
4. Чириков Б. В. «Атомная энергия», 6, 630 (1959).
5. Чириков Б. В. Диссертация, ИЯФ СО АН СССР (1959).
6. Hine M. G. N. Notes from the Conference on the Alternating-Gradient Proton Synchrotron, 1953, p. 16.
7. Орлов Ю. Ф. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 43, 1308 (1962).

ПЕРЕЗАРЯДНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ПРОТОНОВ В КОЛЬЦЕВЫЕ УСКОРИТЕЛИ

Г. И. Будкер, Г. И. Димов

Институт ядерной физики СО АН СССР

(Докладчик Г. И. ДИМОВ)

Проблема интенсивности, важная в любом ускорителе, становится принципиальной в ускорителе со встречными пучками. В Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР разрабатывается безжелезный ускоритель со встречными пучками протонов, в котором частицы, ускоряемые в противоположные стороны на двух слегка эксцентричных орбитах, сталкиваются в процессе

тонов на дорожку ускорителя за счет перезарядки. Цель работы: отладить систему для накопления во время инъекции предельного тока, определяемого объемным зарядом в пучке.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, в которой инъекция частиц производится в кольцевой накопитель от ускорителя Ван-де-Граафа с энергией 1,5 Мэв.

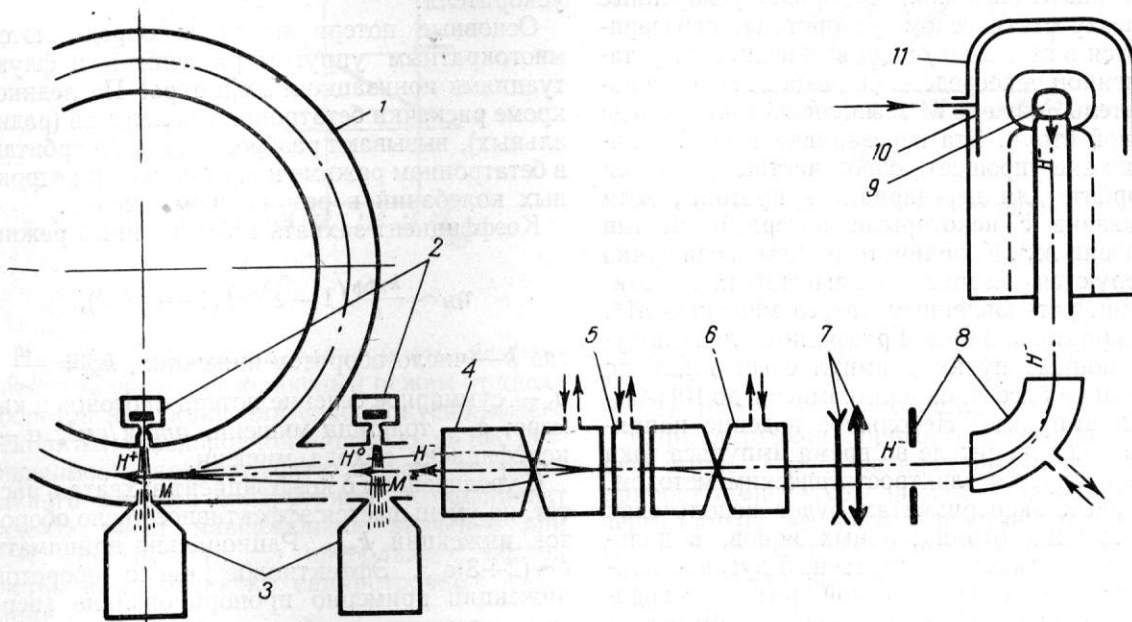


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — кольцевой накопитель; 2 — газовые сопла с затворами; 3 — приемники газа; корректоры: углов (4), кривизны (5), смещения (6); 7 — квадрупольная линза; 8 — магнитный анализатор; 9 — источник H^- ; 10 — лайнер; 11 — ускоритель Ван-де-Граафа. M и M^* — перезарядные мишени.

ускорения. Так как в такой установке нет накопления ускоренных частиц, ее практическая целесообразность очень чувствительна к величине начального тока.

Для этой цели в институте поставлена работа по многооборотной инъекции отрицательных ионов или атомов водорода в ускоритель с развалом их в мишени на орбите и захватом про-

Радус орбиты накопителя $R = 42$ см, полуразмер сечения кольцевой камеры $\Delta R = 0,1 R$. Перезарядная мишень на орбите M должна быть достаточно «прозрачной» для циркулирующих протонов и должна достаточно быстро выводиться из камеры после окончания инъекции. Перезарядная мишень M выполнена в виде газовой струи из сопла Лавала. Наи-

более «прозрачной» для протонов является водородная струя, однако струю с малой расходимостью легче создать из одноатомного газа. Газовая струя пересекает вакуумную камеру и выходит через диафрагму в приемный вакуумный резервуар. Нами получена газовая струя в вакууме с расходимостью около 0,1 рад, длиной 10 см. При диафрагме в приемный резервуар диаметром 3 см в рабочем объеме оставалось меньше 1% газа, вытекающего из сопла Лавалья. В дальнейшем намечено в качестве приемника водородной струи применить азотитовый насос. Газовая струя включается только на период инжекции. Включение струи производится с помощью электродинамического затвора. Минимальная длительность полученных нами струй — около 30 мксек. Длительность заднего фронта импульса плотности газа в струе определяется в основном длиной сопла Лавалья.

Отрицательные ионы водорода, ускоренные в электростатическом ускорителе, перезаряжаются в атомы водорода в мишени M^* , установленной непосредственно перед входом в накопитель. Мишень M^* выполнена также в виде газовой струи. Эта перезарядка необязательна, но она упрощает подвод частиц к мишени на орбите для перезарядки в протоны, хотя и связана с некоторыми потерями частиц в мишени M^* . Координаты и углы ввода пучка юстируются независимо магнитными корректорами, установленными перед мишенью M^* .

Ускоритель Ван-де-Граафа позволяет получать ионные пучки с импульсным током до нескольких десятков миллиампер и до 10^{14} частиц в импульсе. Небольшое падение напряжения на ускорителе во время импульса тока компенсируется электростатическим методом. В первых экспериментах будет использован ВЧ-источник отрицательных ионов, в дальнейшем — применен импульсный дуговой ионный источник с перезарядкой протонов в водородной мишени. Отсос протонов в этом источнике производится непосредственно из вытекающей из разрядной камеры плазмы на вытягивающий электрод в виде сетки. Непосредственно за сеткой размещается трубка с водородом для перезарядки. Напуск водорода в дуговую камеру и перезарядную трубку — импульсный с помощью электромагнитных затворов. При прохождении протонного пучка через перезарядную мишень ожидается компенсация положительного объемного заряда за счет дельта-электронов. Время релаксации пучка по нашим оценкам составляет

примерно 1 мксек. В настоящее время получен протонный ток около 1 а при длительности 100 мксек.

Возможность многооборотной высокоэффективной инжекции протонов прежде всего обусловлена очень сильным преобладанием перезарядки атомов в протоны над обратной перезарядкой при энергии свыше 1 Мэв [1, 2]. При прохождении циркулирующих протонов через перезарядную мишень на орбите, кроме обратной перезарядки, имеют место потери энергии и рассеяние, которое приводит к потере части протонов на стенках ускорительной камеры. Это ограничивает эффективное число оборотов инжекции.

Средние потери энергии [3] можно компенсировать, производя соответствующее ускорение частиц или снижение магнитного поля в период инжекции. Потери протонов зависят от параметров и режима накопителя или ускорителя.

Основные потери протонов определяются многократным упругим рассеянием и флуктуациями ионизационных потерь. Последние, кроме раскочки бетатронных колебаний (радикальных), вызывают разброс частиц по орбитам в бетатронном режиме и раскочку синхротронных колебаний в резонансном режиме.

Коэффициент захвата в бетатронный режим

$$\eta_B \sim \frac{k_{эфф}}{k} (1 - e^{-\frac{k}{k_{эфф}}}) (1 - e^{-\sigma_{01}\delta}),$$

где k — число оборотов инжекции, $k_{эфф} = \frac{\alpha}{\sigma_n \delta}$; σ_n — суммарное сечение потерь протонов в камере; δ — толщина мишени, атом/см²; α — коэффициент обхода мишени.

С увеличением δ коэффициент захвата η растет, но уменьшается эффективное число оборотов инжекции $k_{эфф}$. Рационально принимать $\delta \sim (2 \div 3) \sigma_{01}^{-1}$. Эффективное число оборотов инжекции примерно пропорционально энергии инжекции и обратно пропорционально квадрату апертуры ускорительной камеры и квадрату числа бетатронных колебаний за оборот.

Коэффициент захвата в резонансный режим при нулевой равновесной фазе

$$\eta_C \sim \frac{2}{\pi} (1 - e^{-\sigma_{01}\delta}) \times \int_{1-p}^1 \frac{1 - e^{-\frac{k}{k_{эфф}} p^2(u)}}{p^2(u) \frac{k}{k_{эфф}} \sqrt{Q^2 - (1-u)^2}} du,$$

где $q = \frac{\Delta r}{R}$; $\rho^2(u) = \frac{\mu_x}{u^2} + \frac{\mu_y}{q^2(u-1+q)^2} + \mu_z$;
 $\mu_x = \frac{\sigma_i + \sigma_e}{2\sigma_n}$; $\mu_y = \frac{\sigma_i}{2\sigma_n}$; $\mu_z = 1 - (\mu_x + \mu_y)$;
 Δr — радиальный полуразмер сепаратрисы;
 σ_i — сечение потерь протонов из-за флуктуаций ионизационных потерь энергии; σ_e — сечение потерь протонов из-за многократного упругого рассеяния.

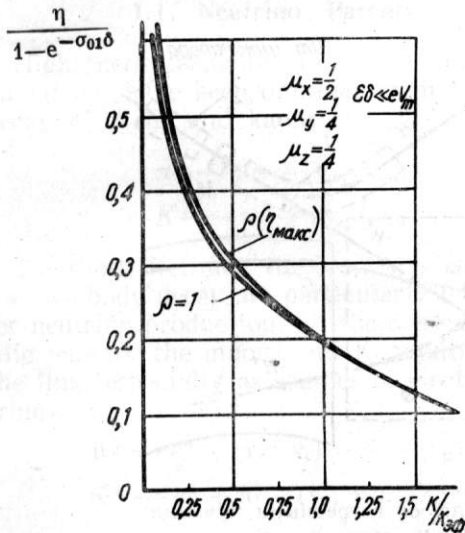


Рис. 2.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента захвата в резонансный режим от числа оборотов инжекции для слабофокусирующего ускорителя с водородной мишенью, на рис. 3 — зависимость коэффициента захвата от радиального размера сепаратрисы. Коэффициент захвата имеет максимальное значение при $q > 1$. При $q < q(\eta_{\max})$ преобладают потери частиц из-за раскачки синхротронных колебаний.

Ионизационное трение в мишени вызывает затухание бетатронных колебаний. При относительно большой апертуре кольцевой камеры средний квадрат амплитуды бетатронных колебаний, отнесенный к квадрату радиуса орбиты, ограничивается величиной порядка отношения масс электрона и протона. При этом основные потери частиц определяются разбросом по орбитам или раскачкой синхротронных колебаний, однократным рассеянием и обратной перезарядкой.

При разнотолщинной по радиусу мишени могут возникать дополнительные затухание

и раскачка радиальных бетатронных и синхротронных колебаний. При этом сумма коэффициентов затухания остается неизменной. Во избежание раскачки радиальных колебаний необходимо ограничить эффективный радиальный градиент толщины мишени.

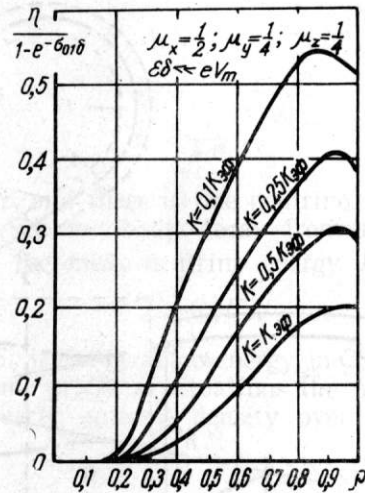


Рис. 3.

Для экспериментальной установки с водородной мишенью $\delta = 4 \cdot 10^{17}$; $\langle x_m^2 \rangle \sim \frac{1}{6} \Delta R^2$; $\langle z_m^2 \rangle \sim \frac{1}{12} \Delta R^2$; $k_{\text{эф}} \sim 10^5$. При $k = 10^4$ (вре-

мя инжекции около 1,5 мсек) коэффициенты захвата $\eta_B \sim 0,88$ (с учетом затухания), $\eta_C \sim 0,37$ (без учета затухания).

Циркулирующие протоны нагревают газовую струю. Чтобы не нарушить струю газа, прирост температуры за время движения газа через камеру не должен превышать примерно 10^{-3} эв. Нагрев мишени может ограничивать накапливаемое число протонов в камере.

При энергии частиц в несколько мегаэлектронвольт $\sigma_{1-1} < \sigma_{10} \ll \sigma_{01} < \sigma_{-10}$, сечение $\sigma_{-11} < \sigma_{-10}$, но отсутствуют сколько-нибудь точные данные по сечению σ_{-11} для энергии порядка мегаэлектронвольт. Если принять $\sigma_{-11} \ll \sigma_{-10}$, то при оптимальной толщине мишени M^* относительный выход нейтральных частиц

$$\Phi_0 = \left(\frac{\sigma_{01}}{\sigma_{-10}} \right)^{\frac{\sigma_{01}}{\sigma_{-10} - \sigma_{01}}}$$

В водородной мишени при энергии ионов водорода в несколько мегаэлектронвольт $\Phi_0 \sim 0,67$.

На рис. 4 показан один из вариантов схемы инжекции частиц в безжелезный слабофокусирующий ускоритель со встречными пучками. В безжелезном ускорителе доступ в сектора магнитным полем затруднен. Поэтому ввод частиц производится на одном из прямолиней-

Разделение пучка частиц от общего инжектора на два производится в мишени M_1^* , толщина которой выбирается из условия перезарядки половины отрицательных ионов водорода. В этом варианте $W = 2 \text{ Мэв}$, $z = 1$, $\delta = 6 \cdot 10^7$, $R = 200 \text{ см}$, $\Delta R = 0,02$, $k_{\text{эф}} \sim 10^4$;

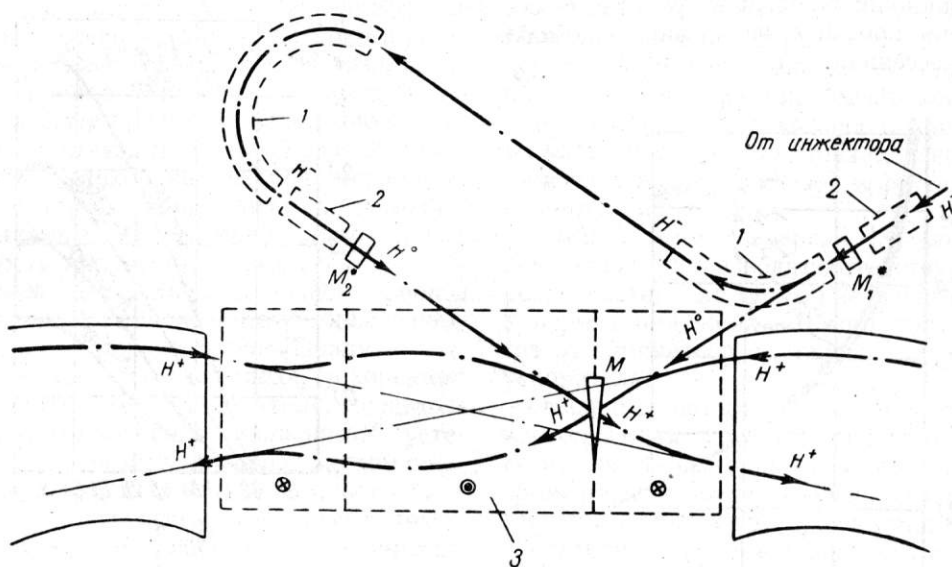


Рис. 4. Прямолинейный промежуток ускорителя со встречными пучками: 1 — поворотный магнит; 2 — корректор; 3 — вводный магнит. M — общая перезарядная мишень; M_1^* — половинная нейтрализующая мишень; M_2^* — нейтрализующая мишень второго пучка.

ных промежутков, где орбиты встречных протонов пересекаются. В промежутке устанавливается вводный магнит, создающий знакопеременное магнитное поле, как это показано на рис. 4. Магнитное поле вводного магнита должно иметь нулевое среднее значение вдоль орбит, быть симметричным относительно своей центральной поперечной плоскости и не изменяться в радиальном направлении. Введение в прямолинейный промежуток вводного магнита не оказывает влияния на бетатронные колебания циркулирующих по орбитам ускорителя протонов. Вводной магнит позволяет вводить атомные пучки в ускоритель под значительным углом к орбитам.

при $k \sim 10^3$ (время инжекции примерно 1 мсек) коэффициент захвата в синхротронный режим $\eta_c = 0,47$.

Перезарядная инжекция в кольцевые ускорители была предложена одним из авторов доклада в 1959 г., возможность такой инжекции указывалась также в более поздней работе [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Barnett C. F., Reynolds H. K. Phys. Rev., **109**, 355 (1958).
2. Allison S. K. Rev. Modern Phys., **30**, 1137 (1958).
3. Whaling W. Handbuch der Physik, **34**, 193 (1958).
4. Heinz Voigt. Патент ФРГ № 1090349 (1961).

РАБОТЫ ПО СИЛЬНОТОЧНЫМ УСКОРИТЕЛЯМ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

I. СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ СО СПИРАЛЬНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

*Е. А. Абрамян, И. Е. Бендер, Л. Н. Бондаренко, Г. И. Будкер,
Г. Б. Глаголев, А. Х. Кадымов, И. Н. Мешков, А. А. Наумов,
В. Е. Пальчиков, В. С. Панасюк, С. Г. Попов, И. Я. Протопопов,
Ю. И. Родионов, И. М. Самойлов, А. Н. Скринский, Л. И. Юдин*

II. СИЛЬНОТОЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ С ОДНОБОРОТНЫМ ЗАХВАТОМ ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

*Г. И. Будкер, Н. Г. Коньков, Ю. А. Мостовой, А. А. Наумов,
О. А. Нежевенко, Г. Н. Острейко, В. С. Панасюк, В. В. Петров,
И. М. Самойлов, А. А. Соколов, И. Я. Тимошин, Л. И. Юдин*

Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

Работы по созданию кольцевых сильноточных электронных ускорителей начаты нами в 1954 г. в целях изучения возможности образования релятивистского стабилизированного пучка. В лабораториях института экспериментально исследуются четыре метода получения больших кольцевых токов релятивистских электронов:

1. Спиральный метод накопления электронов в установках бетатронного типа с последующим бетатронным или синхротронным ускорением [1].

2. Получение предельных электронных токов посредством инжекции электронов из сильноточного линейного ускорителя в кольцевую камеру с большой апертурой с последующим синхротронным ускорением.

3. Накопление электронов на дорожках с постоянным магнитным полем посредством многократной инжекции электронов из другого, менее сильноточного ускорителя. Этот метод используется для накопления электронов и позитронов в опытах со встречными пучками и подробно изложен в докладе, прочитанном Г. И. Будкером [2].

4. Получение больших электронных токов посредством ускорения электронов кольцевой плазмы.

В настоящем докладе рассматриваются первые два метода.

I. СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ СО СПИРАЛЬНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

1. Импульсный безжелезный бетатрон с предварительным накоплением заряда (установка Б-2)

Для получения больших электронных токов нами в 1955 г. была создана установка Б-2, представляющая собой безжелезный бетатрон со спиральным накоплением электронов, инжектируемых электронной пушкой, расположенной на внутренней стенке камеры. Принцип действия установки и основные параметры изложены в другой работе [1] и будут кратко повторены при описании импульсного синхротрона Б-2С. Отметим лишь, что предельный объемный заряд в установках такого типа определяется соотношением

$$Q_{\text{пред}} = \frac{(n-0,25) \beta^2 \gamma^3 mc^2}{2(2-n)} \frac{1}{e} \left(\frac{r_k}{r_{\text{и}}} \right)^{2-n} \kappa h,$$

где h — высота пучка; $r_{\text{и}}$ — радиус инжекции; r_k — конечный радиус спирально накопленных электронов; β , γ — релятивистские факторы инжектируемых электронов; κ — коэффициент, учитывающий форму пучка, лежащий в интервале между 1 и 2; n — показатель спада магнитного поля.

Установка Б-2 рассчитана на получение циркулирующих токов релятивистских элек-

тронов порядка 100 а. Первоначально на установке Б-2 при пониженной энергии инжекции был получен кольцевой ток порядка 10 а.

В дальнейшем, в 1957 г., путем повышения энергии инжекции до величины порядка 60 кэ удалось довести ток на внутреннем радиусе ($r_{и} = 14$ см) до 75 а при значении $r_{к} = 47$ см, что дает хорошее согласие с расчетом. Эти результаты были использованы при разработке описываемых далее ускорителей Б-2С и Б-3.

2. Сильноточный импульсный синхротрон Б-2С

В связи с положительными результатами работ по накоплению больших электронных токов в импульсном бетатроне Б-2 в 1956 г. в институте были начаты работы по созданию установки ВЭП-1 со встречными электронными пучками с энергией 100—130 Мэв.

При однооборотном выпуске электронов из циклического ускорителя и однооборотном захвате в накопительные кольца синхротрон обладает рядом преимуществ перед линейным ускорителем, главное из которых заключается в том, что пучок, выпущенный из синхротрона, имеет малый разброс по энергиям и малый фазовый объем, при этом в накопитель может быть захвачена большая часть электронов, ускоренных в синхротроне.

Для накопительных колец ВЭП-1 пучок, выпущенный из ускорителя-инжектора, должен обладать следующими параметрами: энергия 50—130 Мэв; число электронов в импульсе не менее 10^9 при частоте повторений один раз в 10 сек; длительность импульса порядка 10^{-8} сек; фазовый объем по вертикали и горизонтали не хуже $3 \cdot 10^{-2}$ см·рад, разброс энергий в пучке не более $\pm 3 \cdot 10^{-3}$. Для получения пучка электронов с такими параметрами решено было создать на базе бетатрона Б-2 сильноточный импульсный синхротрон Б-2С на энергию 100 Мэв* со спиральным накоплением электронов.

При реконструкции установки Б-2 были внесены следующие изменения: существенно усилены конструктивные элементы обмоток, создающих магнитное поле в камере; разработан разрезной резонатор, позволяющий вести спиральное накопление электронов; в целях лучшего использования конденсаторной

* Повышение энергии электронов до 130 Мэв предполагается получить на накопительных кольцах.

батареи и осуществления коррекции магнитного поля усложнена система коммутации обмоток; для управления положением пучка введены обмотки, создающие гармоники в азимутальном распределении ведущего магнитного поля; введен импульсный дефлектор и экранированный канал для выпуска электронов. Остальные элементы бетатрона Б-2: система разрезных экранов, магнитопровод, создающий вихревое электрическое поле, обечайки камеры, вакуумная система и др. — остались практически без изменений. Кроме

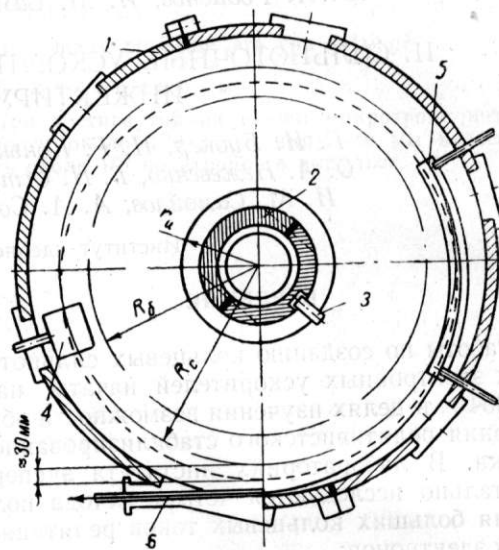


Рис. 1. Упрощенное сечение ускорительной камеры синхротрона Б-2С:

1 — внешняя обечайка; 2 — внутренняя обечайка; 3 — инжектор «пушка»; 4 — резонатор; 5 — дефлектор; 6 — выпускной канал; $r_{и}$ — радиус инжекции; $R_{б}$ — положение бетатронной орбиты; $R_{с}$ — положение синхротронной орбиты; — — — траектория выпуска.

того, при налаживании синхротрона Б-2С широко использовались методика и аппаратура, применявшиеся при наладке экспериментального бетатрона Б-2. В результате с минимальными затратами нам удалось создать сильноточный импульсный синхротрон для инжекции электронов в накопительные кольца.

Схематический разрез установки и последовательность процессов в цикле ускорения показаны на рис. 1 и 2. Инжекция электронов осуществляется из пушки, расположенной на внутренней обечайке, в момент, соответствующий максимальному значению ведущего поля, созданного разрядом специальной конденсаторной батареи на витки электромагнита.

Инжектируемые электроны ускоряются вихревым электрическим полем и движутся по спирали. После того как электроны заполняют

этом электроны асимптотически стягиваются к равновесной бетатронной орбите, положение которой выбирается на среднем радиусе камеры.

Соотношение периодов вихревого и ведущего магнитного поля выбрано таким, что после ускорения электронов до энергии порядка 2 Мэв радиус равновесной орбиты начинает расти, электроны вводятся внутрь ускоряющего резонатора и захватываются в синхротронный режим на радиус равновесной орбиты $R_c = 412$ мм (частота 116 МГц), после чего на наружную часть витков электромагнита включается синхротронная конденсаторная батарея.

В конце ускорения для облегчения условий выпуска равновесная орбита специальными витками сдвигается в сторону выпускного канала. Однооборотный выпуск осуществляется подачей на дефлектор импульса напряжения с временем нарастания 10^{-9} сек и амплитудой до 100 кВ (мощность в импульсе до 10^9 Вт).

В настоящее время на синхротроне Б-2С получена энергия 80 Мэв, которая при необходимости может быть доведена до 100 Мэв. Основные режимы установки и характеристики пучка обследованы при энергии инжекции 20 кэВ и конечной энергии 40 Мэв, на которой проведены первые опыты по накоплению электронов на одну дорожку. При этом в ускорителе получен кольцевой ток около 0,5 а

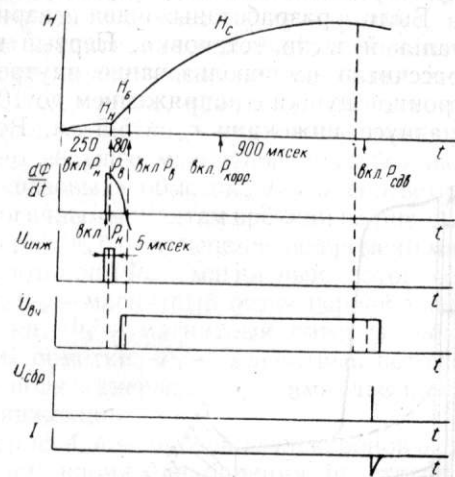


Рис. 2. Схемы последовательности процессов в цикле ускорения установки Б-2С:

H — ведущее магнитное поле; $\frac{d\Phi}{dt}$ — вихревое напряжение; $U_{инж}$ — импульс инжекции; $U_{вч}$ — импульс высокой частоты; $U_{сбр}$ — импульс на дефлектор; I — ток частиц.

всю камеру, включается конденсаторная батарея бетатронного поля и начинается бетатронное ускорение накопленных электронов. При

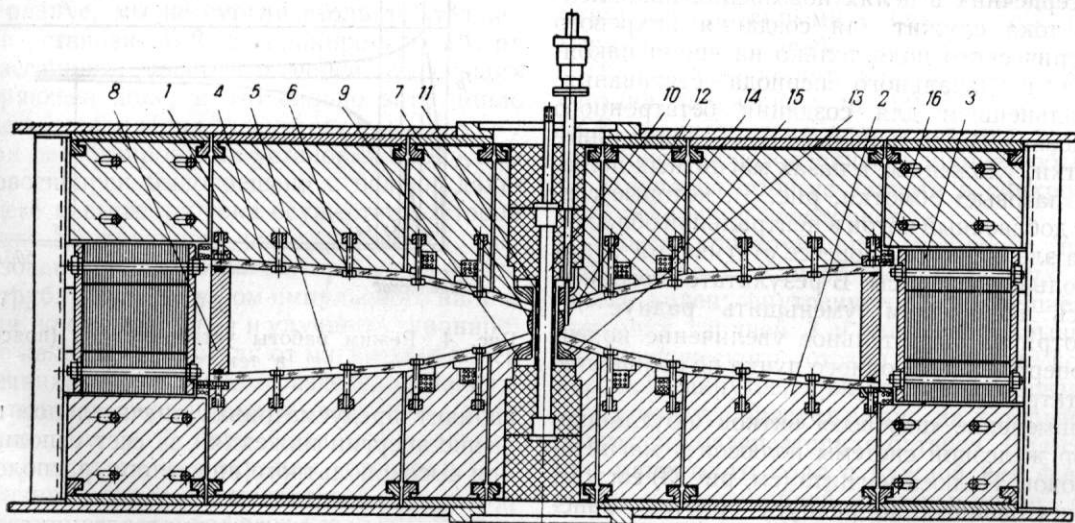


Рис. 3. Схематическое сечение первого варианта установки Б-3:

1, 2 — полюса магнита; 3 — замыкающее ярмо; 4, 5 — крышки вакуумной камеры; 6 — болты вакуумных крышек; 7 — внутренняя обечайка; 8 — наружная обечайка; 9, 13 — система экранов; 10 — сердечник; 11 — обмотка сердечника; 12 — инжектор; 14, 15 — «пазовые» обмотки; 16 — обмотка ведущего поля.

($3 \cdot 10^{10}$ электронов в импульсе) и выпущенный пучок имеет следующие параметры:

- а) число электронов в импульсе в среднем $1 \cdot 10^{10}$;
- б) разброс энергий $\frac{\Delta E}{E} = \pm 2 \cdot 10^{-3}$;
- в) фазовый объем радиальный $10 \cdot 10^{-3} \text{ см} \times \text{рад}$ при радиальном размере $\pm 0,5 \text{ см}$;
- г) фазовый объем вертикальный $6 \cdot 10^{-3} \text{ см} \times \text{рад}$ при вертикальном размере $\pm 0,3 \text{ см}$;
- д) длительность электронного импульса 3—4 нсек;
- е) частота повторений один раз в 20 сек.

3. Импульсный сильноточный бетатрон со спиральным накоплением (установка Б-3)

На основании результатов, полученных на установке Б-2, нами была создана импульсная бетатронная установка Б-3 со спиральным накоплением электронов, рассчитанная на получение токов свыше 100 а при энергии порядка 50 Мэв.

Для получения больших циркулирующих токов согласно соотношению, приведенному в разд. I. 1, важно иметь максимальную энергию инжекции и возможно большее отношение $\frac{r_k}{r_n}$. Максимальный радиус области ускорения r_k ограничен размерами и весом установки, минимальный — размерами сердечника. В отличие от бетатрона Б-2 на установке Б-3 сердечник в целях повышения накопленного тока служит для создания вихревого электрического поля только на время накопления и начального периода стягивания. В дальнейшем для создания бетатронного отношения 1 : 2 используются специальные обмотки, уложенные в пазах магнитных полюсов («пазовые» обмотки, рис. 3), которые создают добавочный поток в центральной области, когда электроны в процессе стягивания уйдут на большие радиусы. В результате этого оказалось возможным уменьшить радиус r_n , несмотря на значительное увеличение конечной энергии электронного пучка по сравнению с бетатроном Б-2.

Применение «пазовых» витков обусловило выбор железной системы полюсов и магнитопроводов. Полюса магнита (см. рис. 3) состоят из шихтованных по радиусу пакетов трансформаторной стали, двенадцать замыкающих ярем расположены равномерно по окружности полюсов. Вакуумная камера образована двумя крышками из органического стекла

радиусом 100 см, притянутыми к полюсам болтами, и двумя обечайками — внутренней и наружной. Сердечник с экранами и частью полюсов представляет отдельную конструкцию. Были разработаны два варианта центральной части установки. Первый вариант рассчитан на использование внутренней электронной пушки с напряжением до 100 кВ, при радиусе инжекции $r_n = 5,5 \text{ см}$. Второй

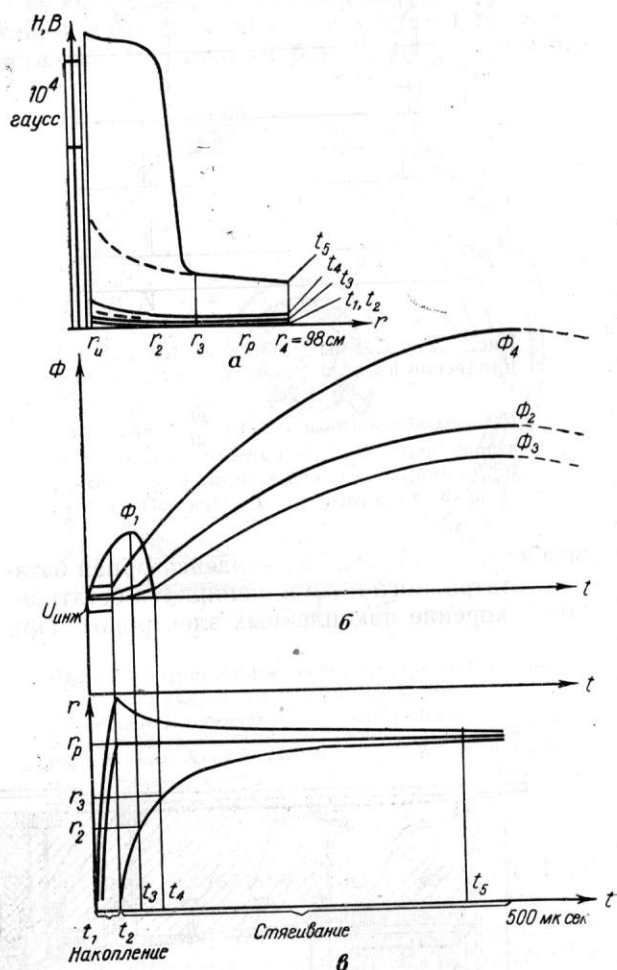


Рис. 4. Режим работы установки Б-3 (пояснения в тексте).

вариант предусматривал значительное повышение энергии инжекции за счет использования высоковольтного инжектора, расположенного снаружи.

Система питания обмоток сердечника, камеры и «пазовых» витков обеспечивает независимую регулировку момента включения и величины тока в каждой обмотке. Один из

возможных режимов установки Б-3 показан на рис. 4.

На рис. 4, а — распределение магнитного поля по радиусу в различные моменты времени ($r_{ин}$ — радиус инжекции, r_2 — радиус, на котором магнитное поле первой «пазовой» обмотки уже практически не искажает ведущее поле; r_3 — то же, что и r_2 , но для второй «пазовой» обмотки; штриховыми линиями показано ведущее магнитное поле без включения «пазовых» обмоток; t_1 — t_5 соответствуют аналогичным моментам времени на рис. 4, б и в).

На рис. 4, б — изменение во времени магнитных потоков (Φ_1 — магнитный поток сердечника; Φ_2 — магнитный поток первой «пазовой» обмотки; Φ_3 — магнитный поток второй «пазовой» обмотки; Φ_4 — магнитный поток ведущего поля камеры; $U_{инж}$ — импульс напряжения инжекции).

На рис. 4, в — движение электронов по радиусу во время накопления и стягивания. В общем случае равновесный радиус r_p может меняться во время стягивания заранее заданным образом.

В Москве к 1961 г. элементы первого варианта установки были отлажены. При энергии инжекции 50 кэВ достигнут циркулирующий электронный ток около 15 а на радиус 80 см ($1,5 \cdot 10^{12}$ электронов) при энергии 35 МэВ. Исследования возможности накопления больших токов с первым вариантом центральной части установки не проводились в связи с тем, что, стремясь предельно уменьшить начальный радиус, мы не смогли столь тщательно, как в установке Б-2, заэкранировать камеру от рассеянных магнитных полей, создающих ускоряющее поле, и это сильно затруднило процесс накопления электронов.

При перебазировании установки из Москвы в Новосибирск было решено с целью дальнейшего повышения тока осуществить второй вариант центральной части установки, используя в качестве инжектора ускорительную трубку с генератором импульсного напряжения по схеме Маркса и улучшить экранирование камеры ускорителя от магнитных полей сердечника за счет полного разделения магнитных потоков сердечника и ведущего поля камеры. Для этой цели были использованы экраны, аналогичные экранам установки Б-2, обеспечивающие вывод магнитного потока сердечника за пределы полюсов установки. Одновременно с переделкой системы экранирования был произведен ряд дополнительных технических усовершенствований установки Б-3.

В настоящее время установка монтируется в Новосибирске. Согласно соотношению, приведенному в разд. I.1, при энергии инжекции 500 кэВ можно получить на радиусе 80 см циркулирующий ток около 10^3 а с энергией около 40 МэВ, но в этой установке возможно уменьшение величины предельного тока вследствие отражений в полюсах.

II. СИЛЬНОТОЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ С ОДНОБОРОТНЫМ ЗАХВАТОМ ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

1. Безжелезный одновитковый сильноточный синхротрон (БСБ)

Импульсный синхротрон БСБ, рассчитанный на частоту повторений два-три раза в минуту, относится ко второй группе разрабатываемых у нас сильноточных синхротронов. В основу конструкции синхротрона положена идея безжелезной одновитковой магнитной системы, значительно упрощающей решение проблемы усилий по сравнению с обычными многовитковыми безжелезными машинами. Описываемый синхротрон имеет следующие особенности: а) отсутствует бетатронный режим ускорения; б) применяется высоковольтный сильноточный инжектор, обеспечивающий токи до 200 а; в) используется однооборотный захват с помощью отклоняющих пластин, напряжение на которых снимается быстродействующими разрядниками, синхронизированными с инжектором; г) камера имеет увеличенное сечение.

По усилиям конструкция синхротрона рассчитана на энергию до 400 МэВ. Установка БСБ предназначена для ускорения предельных токов, обусловленных влиянием объемного заряда на процесс захвата и синхротронного ускорения электронов.

Схема конструкции* ускорителя приведена на рис. 5. Камера состоит из двух дюралевых колец: внутреннего 1 и внешнего 2, стянутых верхней 3 и нижней 4 крышками из органического стекла. Внешнее кольцо короткозамкнутое, а внутреннее, разрезанное по диаметру, образует виток, на который разряжается конденсаторная батарея. Для создания магнитного поля с нужной для фокусировки конфигурацией стороны колец, ограничивающие дорожку для частиц, профилиро-

* Конструкторские работы выполнены П. И. Медведевым.

ваны по радиусу. Средний радиус дорожки 41 см, зазор между кольцами 10 см. Толщина колец: внутреннего 6,5 см, внешнего 15 см. Высота колец 30 см. Камера располагается между двумя дюралевыми экранами 11, 12.

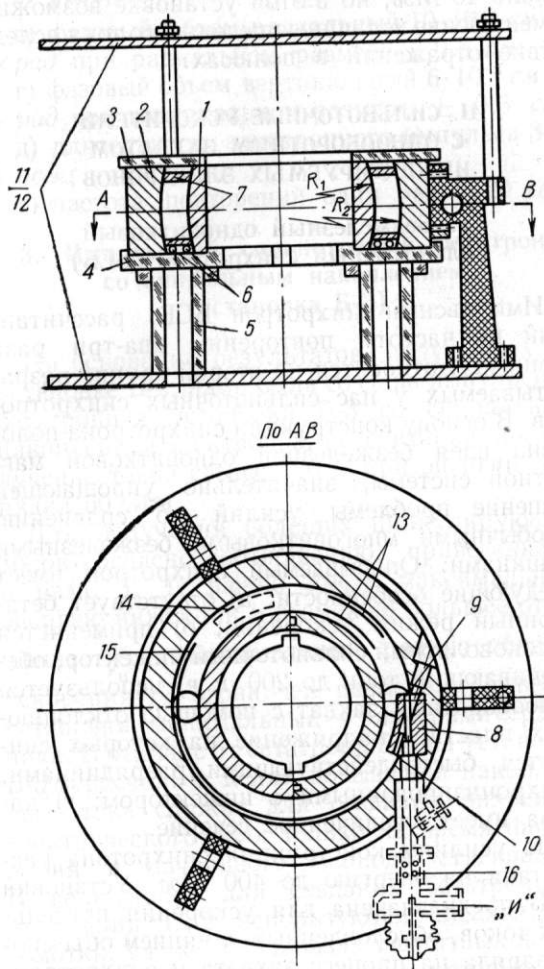


Рис. 5. Конструкция синхротрона БСБ:

5 — откачные фарфоровые патрубки; 6 — кольцевые стеклянные ловушки, охлаждаемые жидким азотом; 7 — экраны с аквадаговым покрытием. Остальное — см. в тексте.

При радиусе синхротронной орбиты 43 см для достижения энергии электронов 400 Мэв требуется магнитное поле 30 кэ, при этом давление магнитного поля на кольца составит 40 атм. Показатель спада магнитного поля $n = 0,4$. Внутренний виток с током можно точно уравновесить, подвергая его только всестороннему сжатию. В установке компенсация усилий на внутреннем кольце выдержана с точностью 5%.

Для ввода электронов в камеру и вывода ускоренных частиц во внешнее кольцо врезан профилированный по радиусу дюралевый вкладыш 8, в котором совместно с внешним кольцом профрезерованы входной 9 и выходной 10 каналы. Размещение в камере резонатора 14, пластин захвата 13 и пластин выпуска 15 показано на рис. 5.

Конструкция всех элементов, располагаемых в камере, выполнены таким образом, что апертура составляет 8×10 см.

При наладке установки используется разрабатываемый под руководством Б. Г. Ерозолимского и при участии Л. Н. Бондаренко и Г. И. Яснова инжектор (рис. 6), выполненный в виде отрезка коаксиальной линии 1. Отрезок линии с одного конца закорочен, а на другом, разомкнутом конце размещается катодный узел, накал к которому подается внутри центральной трубы коаксиальной линии. К середине этой линии через разрядник P_0 подключена низкоомная коаксиальная линия 2, которая заряжается от генератора 3 импульсных напряжений (ГИН), собранного по схеме Маркса.

ГИН срабатывает от запускающего импульса, заряжая в апериодическом режиме линию 2 примерно за $4 \cdot 10^{-7}$ сек через малоиндуктивное проволочное сопротивление 4. При этом зазор разрядника P_0 выставляется таким образом, чтобы время запаздывания при его срабатывании было порядка времени зарядки линии 2. Пробой перенапряженного разрядника P_0 позволяет получить крутой фронт [около $(1 \div 2) \cdot 10^{-9}$ сек] напряжения, поступающего на основную линию 1. Волна напряжения, бегущая к разомкнутому концу линии, удваиваясь на конце, создает рабочее напряжение инжектора в виде импульса прямоугольной формы. Для увеличения электрической прочности и сокращения длин линий 1 и 2 они залиты трансформаторным маслом. Инжектор обеспечивает импульс длительностью около $1,2 \cdot 10^{-8}$ сек, фронт импульса инжекции по измерениям составляет $(2 \div 3) \times 10^{-9}$ сек.

Узел электронно-оптической системы инжектора отделен от объема, залитого маслом, изолятором из оргстекла 5, 6. Для защиты от длительных перенапряжений, связанных с многократно отраженными импульсами в линиях 1, 2 вблизи изоляторов поставлен закорачивающий разрядник P_1 , зазор которого устанавливается так, чтобы время запаздывания его пробоя было порядка длительности

сти импульса инъекции. В правой части линии 1 смонтирована пластина 7 — емкостной делитель инжектора, импульс с которого подается на разрядники пластин захвата.

Однооборотный захват электронов осуществляется с помощью пластин захвата, напряжение на которых снимается разрядниками

2. Сильноточный импульсный синхротрон Б-3М

В 1958 г. в институте было начато проектирование установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2. В 1959 г. мы приступили к разработке сильноточного

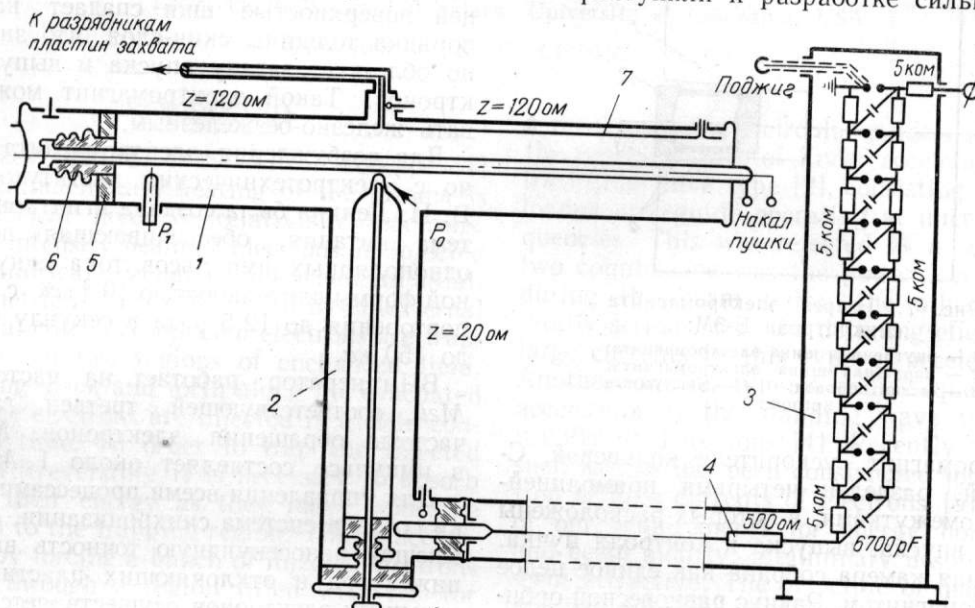


Рис. 6. Схема инжектора.

за время $(1-2) \cdot 10^{-9}$ сек. Предварительная наладка синхротрона производится при энергии инъекции 700 кэв, поэтому для питания ускоряющей системы используется маломощный ВЧ-генератор, частота которого в соответствии с ростом энергии ускоряемых электронов изменяется в пределах от 104,5 до 116 Мгц.

В настоящее время все элементы ускорителя проверены и получено ускорение до энергии 20 Мэв, определяемой мощностью ВЧ-генератора. Во всех предварительных опытах не ставилось задачи получения предельных токов и энергий. Эти исследования начнутся в ближайшее время с использованием более мощного ВЧ-генератора и высоковольтного инжектора.

На первом этапе работы синхротрон БСБ предполагается использовать при энергиях 150—200 Мэв и кольцевых токах в несколько ампер в качестве инжектора для наладки установки со встречными электрон-позитронными пучками.

импульсного безжелезного синхротрона Б-3М с внешней инъекцией, рассчитанного на энергию электронов 350 Мэв при кольцевом токе до 10 а (около 10^{12} частиц в импульсе). На первом этапе работы предполагается получить ток порядка 1 а.

В качестве инжектора для синхротрона Б-3М совместно с Физико-техническим институтом ГКАЭ разработан сильноточный линейный ускоритель (ИЛУ), рассчитанный на получение токов порядка 100 а в импульсе при энергии до 3,5 Мэв.

В отличие от остальных экспериментальных установок института, о которых говорится в докладе, комплекс Б-3М рассчитан на сравнительно большую частоту повторений — до 12,5 раза в секунду и соответственно относительно большие средние мощности и тепловые нагрузки. В связи с этим особое внимание было уделено выбору такой конструкции установки, при которой наилучшим образом использовалась бы энергия магнитного поля ведущего электромагнита. Это

обстоятельство заставило нас при создании Б-ЗМ отказаться от применения метода спирального накопления электронов и остановиться на разработке ускорителя с однооборотным захватом.

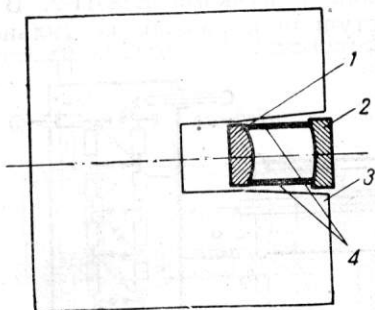


Рис. 7. Разрез электромагнита синхротрона Б-ЗМ:

- 1 — внутренняя шина электромагнита;
 2 — наружная шина электромагнита;
 3 — магнитопровод; 4 — вакуумные крышки.

Электромагнит ускорителя кольцевой, С-образный, разделен четырьмя прямолинейными промежутками, в которых расположены системы впуска, выпуска и контроля пучка. Вакуумная камера собрана как единое целое с электромагнитом. Радиус равновесной орбиты около 1 м. Сечение камеры схематически показано на рис. 7. Магнитное поле создается током, протекающим по шинам 1 и 2 в противоположных направлениях. Основная часть магнитного потока замыкается через магнитопровод 3, набранный из листов трансформаторной стали. Необходимая форма поля в рабочей области создается как формой полю-

сов, так и соответствующим профилем шин, обеспечивающими расчетное значение показателя спада магнитного поля $n=0,6$. При такой конструкции электромагнита рассеянные поля практически отсутствуют, почти вся область между шинами и полюсами пригодна для ускорения. Магнитное поле за внутренней поверхностью шин спадает на длине порядка толщины скин-слоя, что значительно облегчает задачу впуска и выпуска электронов. Такой электромагнит можно назвать железно-безжелезным.

Для возбуждения электромагнита совместно с Электротехническим институтом имени В. И. Ленина была создана игнитронная система питания, обеспечивающая получение однополярных импульсов тока синусоидальной формы длительностью 10^{-3} сек с частотой повторения до 12,5 раза в секунду при токе до 150 ка.

ВЧ-генератор работает на частоте 112,6 Мгц, соответствующей третьей гармонике частоты обращения электронов. Мощность в импульсе составляет около 1 Мвт.

Для управления всеми процессами установки создана система синхронизации, обеспечивающая наносекундную точность включения инжектора и отклоняющих пластин. Впуск и выпуск электронов осуществляется посредством специальных импульсных генераторов.

Установка Б-ЗМ находится в стадии наладки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г. И. CERN Symposium, 1, 68 (1956).
2. Будкер Г. И. См. наст. сб., стр. 274.

ИМПУЛЬСНЫЕ СИЛЬНОТОЧНЫЕ ВЧ-УСКОРИТЕЛИ ДЛЯ ОДНОБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ В СИНХРОТРОН

Ю. А. Гриц, Д. В. Иремашвили, А. А. Наумов, Г. Н. Острейко, В. С. Панасюк,
А. П. Пятницкий, А. А. Чернов, Л. И. Юдин, Г. И. Яснов

Институт ядерной физики СО АН СССР

(Докладчик В. С. ПАНАСЮК)

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1959 г. было начато проектирование сильноточного синхротрона Б-3М с внешней инжекцией электронов [1]. Для него потребовался инжектор электронов на ток в несколько десятков ампер и энергию не менее 1 Мэв. Длительность инжектируемого сгустка электронов во времени (импульса тока) должна быть достаточной для заполнения камеры синхротрона, что при длине равновесной орбиты 700 см и релятивистских электронах составляет примерно 20 нсек. Отклонение от средней энергии электронов в сгустке не должно превышать $\pm 0,5\%$.

Импульсная мощность пучка инжектора составляет десятки мегаватт. Для получения столь высокой мощности пучка реализуют энергию электрического поля, накапливаемую за время, много большее длительности импульса электронов. Г. И. Будкером и А. А. Наумовым было предложено несколько типов ускорителей, основанных на этом принципе, часть из которых разрабатывается в Институте ядерной физики СО АН СССР. Необходимость в относительно быстром сооружении инжектора такого типа побудила использовать проверенный уже принцип, когда накопителем энергии электрического поля служит радиотехнический резонансный контур. Подобный ускоритель был предложен и описан группой авторов [2].

Для увеличения длительности импульса тока ускоренных частиц при довольно жестких требованиях к однородности электронов по энергии потребовалось сильно понизить частоту ВЧ-напряжения по сравнению со случаем, о котором говорится в другой работе [2]. Разработку инжектора на энергию 3,5 Мэв и ток около 100 а принял Физико-технический институт АН Грузинской ССР. Группой сотрудников этого института была предло-

жена конструкция инжектора, которая легла в основу разработки. В дальнейшем из-за причин, не зависящих от разработчиков, изготовление инжектора начало существенно запаздывать по сравнению с изготовлением самого ускорителя. Это заставило искать возможности для изготовления упрощенных конструкций инжекторов такого типа с целью обеспечения начального цикла работы по настройке ускорителя.

В Институте ядерной физики СО АН СССР в короткий срок был изготовлен инжектор, использующий коаксиальную длинную линию в качестве резонансного контура. С помощью этого инжектора были проведены первоначальные работы по исследованию электронно-оптических свойств ускорителя и канализирующего устройства. Примерно через год этот инжектор был заменен более эффективным, так называемым «малым спиральным», изготовленным в Физико-техническом институте АН Грузинской ССР. Основной инжектор на энергию электронов 3,5 Мэв и ток около 100 а еще не готов.

Работы по инжекторам описанного здесь типа были проведены А. А. Наумовым.

2. БЛОК-СХЕМА КОМПЛЕКСА УСТРОЙСТВ УСКОРИТЕЛЯ

Оба типа инжектора имеют одинаковую блок-схему комплекса аппаратуры (рис. 1). Импульсный двухкаскадный ВЧ-генератор возбуждает резонансный контур инжектора. Через кабель из резонатора ответвляется часть мощности для возбуждения ВЧ-усилителя. Импульсный автогенератор подвозбуждения с внутренней обратной связью служит для предварительного возбуждения резонатора, т. е. прохождения области низкой добротности при малых амплитудах ВЧ-напряжения (мультипактор). Импульсный моду-

лятор питает ВЧ-генераторы. Модулятор электронной пушки служит для отпириания этой пушки, которая заперта в период накопления ВЧ-мощности в резонаторе. Блок фиксации ВЧ-фазы осуществляет синхронизацию момента отпириания пушки с определенной фазой

анализа работы разного типа линейных ускорителей и циклотронов. Конструкция упрощается в том случае, если резонатор располагается вертикально и отпадает необходимость в массивных приспособлениях, связанных с созданием элементов повышенной

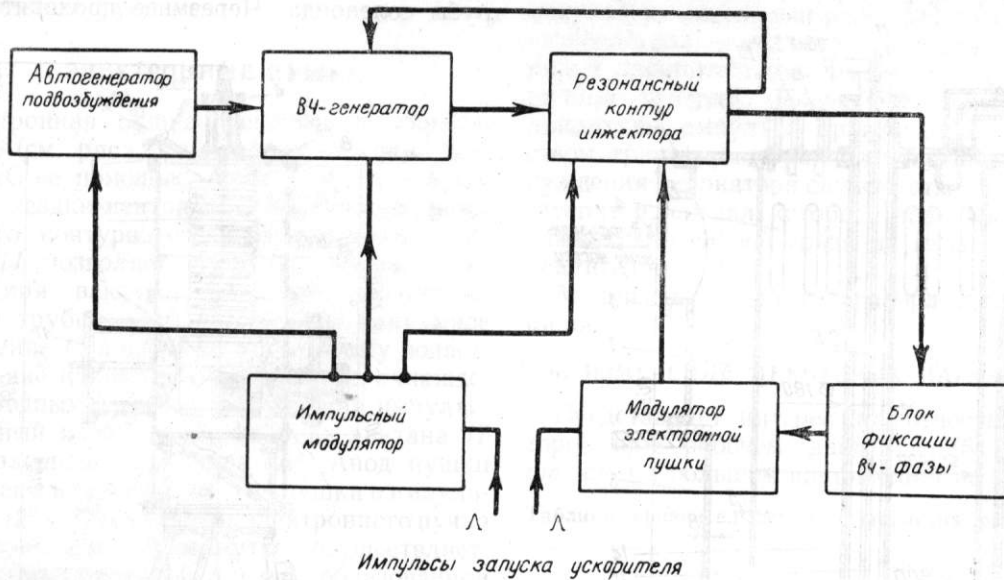


Рис. 1.

ВЧ-напряжения. Оба типа инжектора могут работать с частотой повторения импульсов 12,5 раза в секунду.

3. КОНСТРУКЦИИ

Резонатор инжектора первого типа представляет собой коаксиальную четвертьволновую линию 1 (рис. 2), нагруженную конденсатором, емкость которого образуется специальной насадкой 2 на внутреннем электроде линии с одной стороны и дном и стенками внешнего электрода — с другой. Значительное понижение собственной частоты резонатора связано с увеличением индуктивности, т. е. чрезмерно большими габаритами. Понижение собственной частоты путем увеличения емкости за счет длины ускоряющего промежутка вызывает потерю электрической прочности и увеличение мощности, необходимой для возбуждения резонатора. Длина ускоряющего промежутка в данном случае взята исходя из предполагаемого градиента порядка 100 кВ/см. Это число было выбрано на основании

жесткости. Последнее обстоятельство позволило сделать малую толщину медных стенок внутреннего и внешнего электродов резонатора и резко упростить юстировочные приспособления.

Весь резонатор помещен в отрезке стандартной стальной трубы большого диаметра 3, которая является его вакуумным кожухом. Для создания необходимых условий откачки внешний электрод резонатора имеет продольные щели 4, расположенные на уровне откачного фланца насоса 5. Ускоритель откачивается одним паромасляным насосом типа ВА-8-5 с азотной ловушкой, имеющей четыре ряда жалюзи и охлаждаемые стенки для предотвращения миграции масла из насоса в откачиваемый объем. К верхней крышке резонатора 6 прифланцовывается фидер ВЧ-питания резонатора 7 и 8, ВЧ-кабель обратной связи 9, измерительный кабель 10. Все фидеры связаны с резонатором петлями связи. Связь с основным питающим фидером может меняться без нарушения вакуума с помощью специальных экранов, надвигае-

мых на петли. Охлаждение внутреннего электрода — водяное (напаивные трубки), внешнего — излучением. Для измерения напряжения на ускоряющем промежутке служит емкостной датчик 12, расположенный в нижней крышке внешнего электрода. Все основные габаритные размеры приведены на рис. 2.

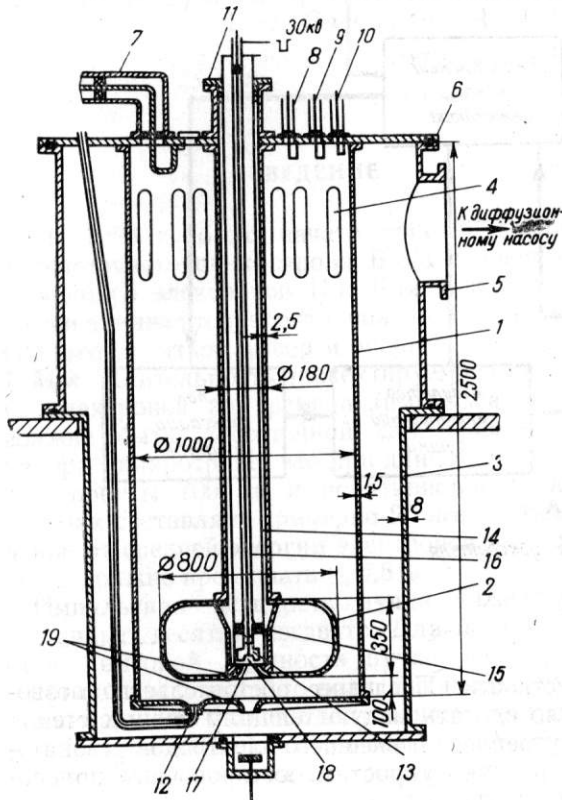


Рис. 2.

На рис. 3 схематически изображена конструкция резонансного контура инжектора второго типа. Соленоид из медной трубы 1 заключен в стальной цилиндр 2, откачиваемый снизу диффузионным насосом типа ВА-8-5 через ловушку, аналогичную описанной. Верхней частью соленоид крепится к фланцу 3, являющемуся одновременно крышкой стального цилиндра. На фланце укреплен вакуумноуплотненный изолятор 4 для введения центрального электрода фидера связи с генератором.

К нижней части соленоида крепится специальная насадка 5, являющаяся одним из электродов конденсатора резонансного контура. Другим электродом являются стенки

стального цилиндра и экран 6 с отверстиями, необходимыми для откачки. Внутри насадки размещены электронная пушка 7 и некоторые детали, схемы управления электронной пушкой. Последние находятся в специальной вакуумноуплотненной коробке, образующей единый объем с внутренней полостью трубы соленоида. Через нее проходят кабе-

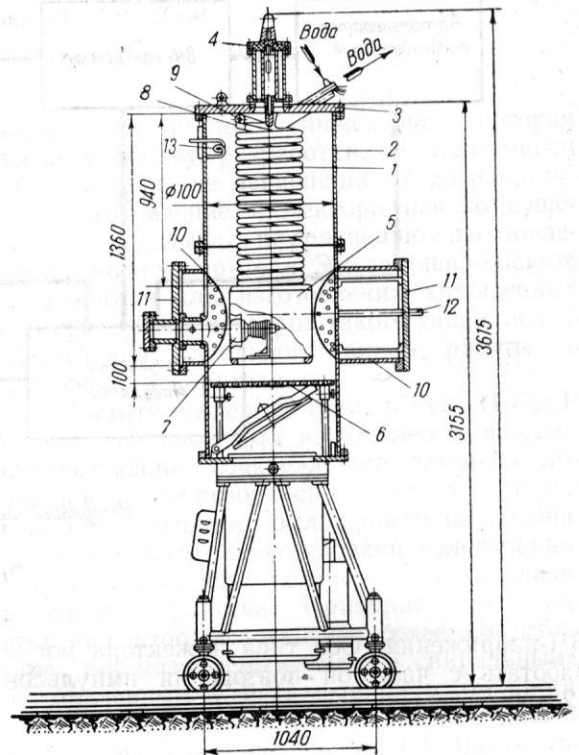


Рис. 3.

ли 8 для питания пушки. Подключение к электронной пушке производится через клеммы в вакуумноуплотненных изоляторах, укрепленных на крышке коробки. Охлаждается соленоид через специальную трубу с проточной водой 9, напаянную по всей длине соленоида.

В нижней части стального цилиндра в его стенки врезаны патрубки 10 для вывода пучка и доступа к электронной пушке. Патрубки закрываются вакуумноуплотненными фланцами 11. На одном из фланцев находится емкостной датчик 12 для измерения потенциала на ускоряющем промежутке. Виток связи 13 служит для подачи ВЧ-мощности в цепь обратной связи. Конструктивным недостат-

ком резонансного контура этого типа является неудобство смены катода пушки (операция, связанная с развакуумированием объекта ускорителя) и относительно малая жесткость спирали. Последнее обстоятельство затрудняет юстировку электронно-оптической системы пушки и требует монтажа ускорителя на вибростойком фундаменте.

4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ

Электронная пушка ускорителя первого типа 13 (см. рис. 2) укреплена на конце трубы 14. С ее помощью пушка вводится в полость насадки центрального электрода резонансного контура. Специальный вакуумный шлюз 11 позволяет извлекать пушку без нарушения вакуума в самом ускорителе. Внутри трубки пушки размещено вакуумное уплотнение 15 и шток 16, по которому подается питание накала катода, вода для охлаждения катодных вводов и отпирающий импульс. Ленточный катод из гексаборида лантана 17 имеет площадь, равную 1 см^2 . Анод пушки выполнен в виде сетки 18. Ток пушки в импульсе около 25 а . Фокусировка электронного пучка в ускоряющем промежутке осуществляется электростатической линзой, образованной двумя электродами 19, вмонтированными в насадку центрального штока резонатора и в крышку внешнего электрода.

Электронная пушка ускорителя второго типа принципиально не отличается от описанной. Она имеет катод в виде диска диаметром $1,5 \text{ см}$ с гексаборидлантановым покрытием. Подогрев катода осуществляется электронной бомбардировкой от специального подогревателя. Ток пушки в импульсе около 40 а .

5. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Для питания резонатора служит мощный двухкаскадный ВЧ-усилитель с обратной связью через резонатор. Обратная связь такого рода является надежным способом устранения ухода амплитуды ВЧ-напряжения при расстройке собственной частоты резонансного контура от тепловых разогревов [3].

Выходной каскад ВЧ-усилителя собран по схеме с заземленной сеткой на двух лампах типа ГК-5А, работающих параллельно, входной каскад — по той же схеме на одной лампе типа ГК-5А. Генератор может отдать в нагрузку полезную мощность более 6 Мвт

при импульсном анодном напряжении, равном 25 кв . Длительность импульса модулятора определяется временем нарастания напряжения на контуре и составляет 150 мксек . ВЧ-усилитель соединяется с резонатором фидером электрической длиной $0,1$ длины волны.

В инжекторе первого типа использовался модулятор, описанный ранее [3], в инжекторе второго типа — модулятор с частичным разрядом накопительной емкости через газоразрядные вентили. Последующее повышение амплитуды импульса производилось посредством трансформатора. Для начального возбуждения резонатора служит отдельный автогенератор, сигнал которого подается с помощью весьма слабой связи на вход основного усилителя.

Мощность автогенератора — несколько киловатт.

6. ИЗМЕРЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ

Представляет интерес добротность резонаторов при рабочем давлении ($5 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$) и большом напряжении на ускоряющей

Таблица сравнительных характеристик резонаторов

Сравнительные характеристики	Тип резонатора		
	коаксиальный	спиральный (малый)*	спиральный (основной)*
Высота бака, мм . . .	2500	1500	2500
Диаметр бака, мм . . .	1000	700	2000
Максимальное ускоряющее напряжение, Мв	1,1	1,5	3,5
Максимальный градиент, кв/см	110	150	110
Удельная ВЧ-мощность для получения ускоряющего напряжения 1 Мв , Мвт	1,25	2,00	0,6
Сопротивление, приводящее к пучности напряжения, ом	80	250	500
Эквивалентное сопротивление, приводящее к пучности напряжения, ом	$4 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	10^6
Добротность	5000	1000	2000
Резонансная частота, Мгц	14,5	6,4	3,0
Длительность сгустка с разбросом энергий электронов $\pm 0,5\%$, $\times 10^{-9} \text{ сек}$	3	7	15

* Расчетные данные (находится в изготовлении).

шем промежутке. Добротность измерялась по экспоненте затухания ВЧ-колебаний в резонаторе при быстром запираии ламп генератора и по балансу мощностей.

Добротность резонаторов при больших напряжениях оказалась равной рассчитанной по потерям в металле и измеренной при низком напряжении и атмосферном давлении. Напряжение на ускоряющем промежутке измеряется емкостным датчиком и совпадает с большой точностью с измеренной энергией электронов. В таблице сравнительных характеристик резонаторов приведены сводные электрические параметры описанных здесь типов инжекторов.

Ток ускоренных электронов на зонде, расположенном у входа в канализирующее устройство, в инжекторе первого типа составлял 16 а в импульсе, равном половине периода высокой частоты, в инжекторе второго типа — 25 а.

Положительной особенностью описанных ускорителей является также возможность получения большой средней мощности электронного пучка. Это объясняется возможностью применения в ВЧ-генераторе сравнительно низкочастотных генераторных ламп на

большую среднюю мощность (250, 500 квт). В зависимости от режима работы (требований к спектру энергий и соотношения между средней энергией и величиной тока ускоренных частиц) средняя мощность в пучке может варьироваться от десятков до сотен киловатт. Мощное γ -излучение такого пучка можно использовать для промышленных нужд.

В разработке отдельных узлов описанных инжекторов принимали участие сотрудники Института ядерной физики СО АН СССР В. А. Борисов, И. А. Самохин, В. Г. Гниденко, А. П. Афонин, А. В. Макиенко, В. П. Алексеев, Л. И. Кольченко, сотрудники Физико-технического института АН Грузинской ССР: В. И. Вишневский, Я. Р. Абасоглы, В. Е. Зеленин, М. И. Матросов, Ю. Ш. Венедиктов, В. Н. Рыбин, Г. М. Сигидин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г. И., Наумов А. А. и др. См. наст. сб., стр. 1065.
2. Толок В. Т., Болотин А. И. и др. «Атомная энергия», 11, 41 (1961).
3. Борисов В. А., Острейко Г. Н., Панасюк В. С., Юдин Л. И., «Приборы и техника эксперимента», № 4 (1963).