

БЕЗЖЕЛЕЗНЫЙ ОДНОВИТКОВЫЙ СИНХРОТРОН БСБ

Г. И. Будкер, П. И. Медведев, Ю. А. Мостовой,
О. А. Нежевенко, А. Б. Нелидов, Г. Н. Острейко, В. С. Панасюк,
И. М. Самойлов и А. А. Соколов

Дано описание безжелезного синхротрона оригинальной конструкции, предназначенного для использования в качестве инжектора в установке со встречными электронными пучками. Электроны ускорялись до энергии 180 Мэв. Приведены результаты исследования важнейших характеристик ускорителя.

Введение

На протяжении ряда лет в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО АН СССР изучается возможность создания безжелезных ускорителей на основе использования одновитковых магнитных систем с уравновешенным по механическим усилиям витком тока и с формированием магнитных полей за счет скин-эффекта. Это позволяет поновому подойти к решению важнейшей проблемы безжелезных магнитов — проблемы механических усилий — и дает возможность в принципе довести величину магнитного поля до ~ 200 кэ, что соответствует по магнитному давлению пределу текучести металла. На указанных принципах в Институте ядерной физики СО АН СССР был разработан и запущен небольшой синхротрон СБ^[1, 2]. Формирование ведущего магнитного поля частично за счет скин-эффекта осуществлено также в двух других, разработанных в ИЯФ СО АН СССР синхротронах — Б2-С и Б3-М^[3].

Описываемый ниже одновитковый синхротрон БСБ, в отличие от синхротрона СБ, имеет ряд конструктивных и принципиальных особенностей, обусловленных целевым назначением ускорителя, который проектировался в качестве одного из вариантов инжектора для электронного накопителя ВЭП-1 (2×130 Мэв)^[4].

Очевидно, что наиболее удобным инжектором для встречных электронных пучков был бы ускоритель, который в минимальном количестве циклов ускорения дает число частиц, достаточное для проведения эксперимента на встречных пучках. Для этого было решено прежде всего использовать высоковольтную внешнюю инжекцию в сочетании с однооборотным захватом, позволяющим в принципе иметь эффективность захвата, близкую к 100%. Исходя из опыта, имевшегося в ИЯФ к началу проектирования ускорителя, можно было, с одной стороны, надеяться, что технически реально создание сильноточного инжектора на энергию $500 \div 1000$ кэв, а с другой стороны, была видна возможность осуществления однооборотной инжекции электронов, несмотря на то что для эффективного захвата частиц необходимо обеспечить управляемую коммутацию напряжений в десятки киловольт за время $1 \div 2 \cdot 10^{-9}$ сек.

Обычно в безжелезных ускорителях для облегчения проблемы питания стремятся предельно уменьшить энергию, запасаемую в магните. Однако, исходя из тех же соображений максимальной импульсной интенсивности, апертура ускорителя была выбрана достаточно большой. При

этом не ставилась цель уменьшить энергоемкость магнита, учитывая сравнительно невысокую требуемую энергию частиц (~ 130 Мэв) и низкую частоту повторения рабочих импульсов [4].

Для сохранения эффективной радиальной апертуры камеры была разработана схема модуляции частоты ускоряющего высокочастотного напряжения, позволяющая начинать ускорение с энергии инжекции 500 кэв.

Являясь инжектором для накопителя, синхротрон БСБ представляет, с другой стороны, интерес и с точки зрения изучения особенностей работы безжелезных ускорителей. Поэтому во всех случаях, когда это не мешало основной задаче — созданию инжектора для накопителя ВЭП-1, все узлы синхротрона проектировались таким образом, чтобы можно было проводить самостоятельные исследования по выяснению возможностей машин данного типа.

Схематическое описание синхротрона БСБ дано в [3]. В настоящей работе более подробно описывается устройство отдельных узлов синхротрона и приводятся экспериментальные данные, полученные при его наладке.

1. Магнит и камера ускорителя

Конструктивной основой ускорителя является магнит (рис. 1, а, 1, б). Он представляет собой два массивных кольца 1 и 2 из дюралюминия, толщиной соответственно 6,5 и 15 и высотой 30 см. В зазоре между кольцами расположена ускорительная дорожка. Ширина зазора 10, средний радиус дорожки 41 см. Внешнее кольцо сплошное и может выдерживать давление магнитного поля в 50 атм., что соответствует энергии 450 Мэв. Внутреннее кольцо имеет вертикальный разрез по диаметру. В качестве изоляции на стыках половинок этого кольца проложена вакуумная резина толщиной 1 мм. Один разрез закорочен с внутренней стороны перемычкой, к другому разрезу с помощью плоской экранированной шины 3 подводится ток возбуждения магнита. Конструкция шины допускает симметричный (сверху и снизу) подвод тока к магниту. Соединение перемычки и шины с кольцом 1 выполнено одинаковым образом для большей электрической эквивалентности обоих стыков, что уменьшает первую гармонику возмущения ведущего магнитного поля. В местах контактов для обеспечения их равномерности проложен тонкий металлический чулок из луженой медной проволоки, раздавливающийся при затяжке болтов.

Принципиально важной особенностью магнита является то, что площадь, ограниченная внутренним кольцом, выбрана равной площади зазора между кольцами. Это приводит к примерно одинаковому давлению магнитного поля на внутреннее кольцо изнутри и снаружи, т. е. кольцо 1 оказывается уравновешенным по усилиям, испытывая лишь всестороннее сжатие.

Стенки колец, ограничивающие ускорительную дорожку, обработаны под необходимую кривизну силовых линий магнитного поля, соответствующую $n=0.4$, и формируют магнитное поле за счет скин-эффекта. Область устойчивости по вертикали ($0 < n < 1$) составляет 16 см. Искажения орбиты на среднем радиусе, связанные с азимутальной неоднородностью поля, не превышают 5—8 мм (данные относятся к циклу ускорения в 500 мксек.). Подводящая шина и внутреннее кольцо имеют водяное охлаждение. Полный вес магнита равен 500 кг. Более подробно характеристика магнитного поля ускорителя дана в работе [5].

Кольца 1 и 2 стянуты и уплотнены на вакуум верхней 4 и нижней 5 крышками из органического стекла. Нижняя крышка массивная, толщиной 60 мм, несет тяжесть внутреннего кольца и жестко фикси-

рует его положение относительно внешнего кольца. Верхняя крышка, толщиной 20 мм, имеет пять окон, закрытых фланцами из органического стекла. Через окна вставляются инфлектор 6, резонатор 7, пояс Роговского, пикап-электроды и различные пробники. Для пробников предназначены 10 патрубков \varnothing 5 см, имеющих по два на обеих крышках 4 и 5, так и на фланцах. Конструкции всех элементов, располагаемых в камере, выполнены таким образом, что свободная радиальная апертура составляет 7,5, вертикальная 12 см. Крышки 4 и 5 защищены от попадания на них рассеянных электронов кольцевыми экранами 8 из органического стекла с аквадаговым покрытием.

Для ввода электронов в камеру и вывода ускоренных частиц во внешнее кольцо врезан дюралюминиевый вкладыш 9, в котором совместно с внешним кольцом профрезерованы входной 10 и выходной 11 каналы. Наличие вкладыша позволяет свести к минимуму искажение поля на орбите, связанное с наличием каналов 10 и 11. Сменность вкладыша,

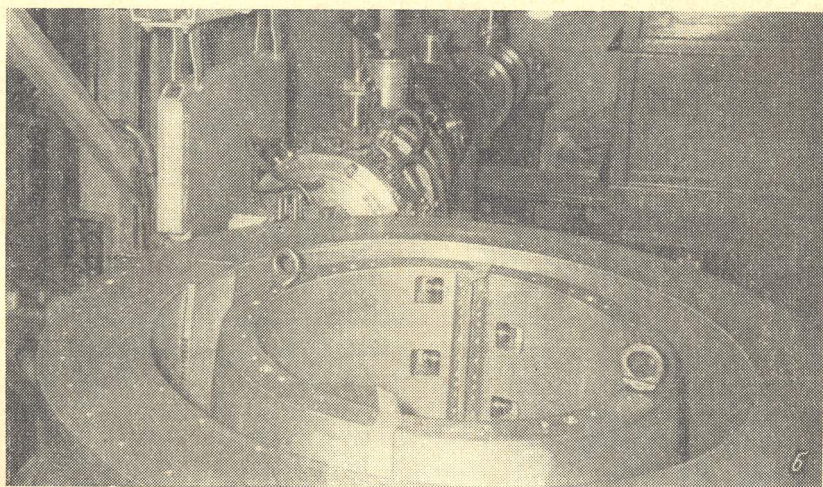
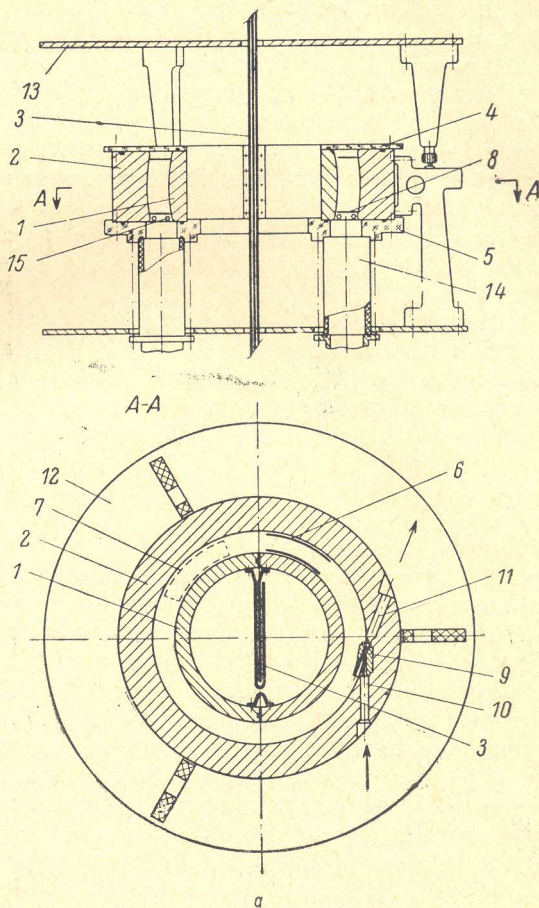


Рис. 1.

a — Схематический чертеж ускорителя. (Пояснения в тексте). Более подробно о конструкции вкладыша и фидера, подводящего ток к магниту, см. в работах [6] и [7]; *б* — общий вид магнита со снятой верхней крышкой.

с одной стороны, значительно упрощает обработку внутренней поверхности кольца 2, а с другой стороны, позволяет в некоторых пределах менять угол каналов 10 и 11 относительно касательной к орбите путем доработки одного лишь вкладыша. В месте входа электронов в камеру входной канал имеет ширину 1 см, высоту 10 см. Для механической прочности и уменьшения возмущений магнитного поля входной канал имеет перегородки толщиной 0.1 см, длиной 2.0 см, расположенные с шагом 1 см, так что прозрачность входного канала составляет 0.9. Так как по ряду причин (см. работу [6]) между входной щелью и центром инфлектора было выбрано расстояние по азимуту в 65° , то для максимальной эффективности однооборотного захвата ось входного канала отклонена на 4° внутрь по отношению к касательной.

Внешнее кольцо 2 держится на трех гетинаксовых опорах, закрепленных на массивном (толщина 25 мм) алюминиевом диске 12. Точно такой же диск 13 расположен сверху над ускорителем. Помимо чисто конструктивного значения, эти экраны создают симметричные по z граничные условия для магнитного поля.

2. Вакуумная система

Камера ускорителя откачивается через фарфоровые стаканы 14 (рис. 1) двумя вакуумными агрегатами ВА-0.5-1, в которых применены наливные азотные ловушки. Азотная ловушка имеется также в камере инжектора. Наличие большой поверхности органического стекла в вакуумном объеме около 2.5 м^2 (из них 0.5 м^2 покрыто аквадагом) вызвало опасения за качество вакуума, поэтому в камере были предусмотрены две кольцевые стеклянные ловушки 15, лежащие на нижней крышке. Однако впоследствии от них решено было отказаться, так как при наличии ловушек в насосах в камере достигается давление $3 \div 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Система форвакуумной откачки ускорителя снабжена форвакуумным баком емкостью 140 л и азотной ловушкой. Благодаря этому возможна нормальная работа ускорителя без включения форвакуумного насоса в течение 15—20 час. Полный расход жидкого азота на всю установку составляет 2.5—3.0 л/час.

3. Система питания магнита

Питание магнита ускорителя осуществляется от конденсаторной батареи с помощью импульсного трансформатора. Применение трансформатора позволяет, с одной стороны, удлинить цикл ускорения, уменьшив величину ускоряющего напряжения на резонаторе, а с другой стороны, облегчает задачу коммутации тока. Трансформатор имеет О-образный сердечник сечением 600 см^2 . Первичная и вторичная обмотки состоят соответственно из 40 и 4 витков, средняя точка первичной обмотки заземлена. Основная конденсаторная батарея суммарной емкости 0.045 ф (300 шт. конденсаторов ИМ-5/150) разбита на две равные секции с максимальным зарядным напряжением $+5$ и -5 кв, которые управляемым вакуумным разрядником коммутируются последовательно на первичную обмотку трансформатора. При индуктивности магнита в 350 см период колебаний основного разрядного контура равен 5.5 мсек., добротность $Q=2.7$ и ток нарастает до максимального значения за время 1.2 мсек. При полностью заряженной батарее ток в магните составляет около 10^6 а, что соответствует максимальной, полученной на ускорителе энергии в 180 Мэв.

В схеме питания магнита используются также две небольшие вспомогательные конденсаторные батареи, коммутируемые управляемыми разрядниками. Это позволяет иметь специальный закон нараста-

ния ведущего магнитного поля во времени, обеспечивающий квазипостоянное поле в момент инжекции и существенно удлиняющий предварительный этап ускорения, связанный с частотной модуляцией напряжения на резонаторе (рис. 6). По сравнению со случаем инжекции в синусоидально нарастающее до максимального значения поле такой закон изменения поля во времени значительно облегчает требования к синхронизации с полем момента включения инжектора, упрощает требования к высокочастотной системе (уменьшается скорость модуляции и необходимое начальное напряжение на резонаторе), существенно уменьшает искажение равновесной орбиты в начале ускорения, связанное с появлением напряжения на внутреннем витке магнита и, наконец, позволяет отдельно исследовать захват и предварительное ускорение частиц при достаточно высокой частоте срабатывания ускорителя. Более подробное описание системы питания магнита ускорителя приведено в работе [7].

4. Инжектор

Для осуществления эффективной однооборотной инжекции необходимо иметь длительность импульса инжекции $\tau_i \geq \tau_0$, где τ_0 — время оборота частиц в камере, равное в нашем случае при релятивистской энергии инжекции $\sim 10^{-8}$ сек.

Решено было использовать $\tau_i \simeq \tau_0$, так как это позволяло рассчитывать на заметное повышение электрической прочности вакуумного промежутка и изоляторов.

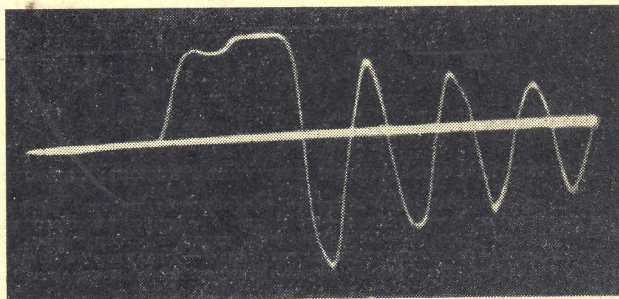


Рис. 2. Импульс напряжения инжекции; амплитуда $W = 600$ кв, ширина импульса у основания $1.4 \cdot 10^{-8}$ сек.

Импульс напряжения инжекции (рис. 2) формируется с помощью короткозамкнутой с одной стороны коаксиальной линии, большая часть которой залита трансформаторным маслом. Длина линии равна 2.6 м. На разомкнутом противоположном конце располагается катод инжектора, накал к которому подается внутри центральной трубы коаксиальной линии. К середине этой линии через обостряющий разрядник (пробой осуществляется непосредственно в масле) подается волна напряжения с фронтом $2 \div 3 \cdot 10^{-9}$ сек. от другой, более низкоомной линии, которая в свою очередь заряжается от генератора импульсных напряжений (ГИН). Более подробное описание электрической схемы инжектора дано в работе [3]. Изоляторы 7 и 8 (рис. 3) отделяют вакуумную камеру инжектора от объема, заполненного маслом. Защита этих изоляторов от воздействия отраженных в формирующей системе импульсов осуществляется закорачивающим разрядником, расположенным в масле непосредственно возле изоляторов. Зазор разрядника подбирается таким образом, чтобы его пробой происходил на заднем фронте импульса инжекции или несколько позже.

Для подавления электромагнитных наводок от инжектора система ГИН — формирующая линия заключена в единый металлический кожух. Дополнительного снижения уровня наводок более чем в 30 раз удалось добиться следующими мерами: все неразъемные стыки были заварены; в разъемных стыках проложена контактная проволочка из луженой меди, раздавливаемая при затяжке болтов; в высоковольтный ввод, подводящий постоянное напряжение к ГИН, был вставлен высокочастотный фильтр — пробка.

Катод инжектора расположен на расстоянии 90 см от входной щели ускорителя. Для увеличения вводимого в камеру тока в канале имеется

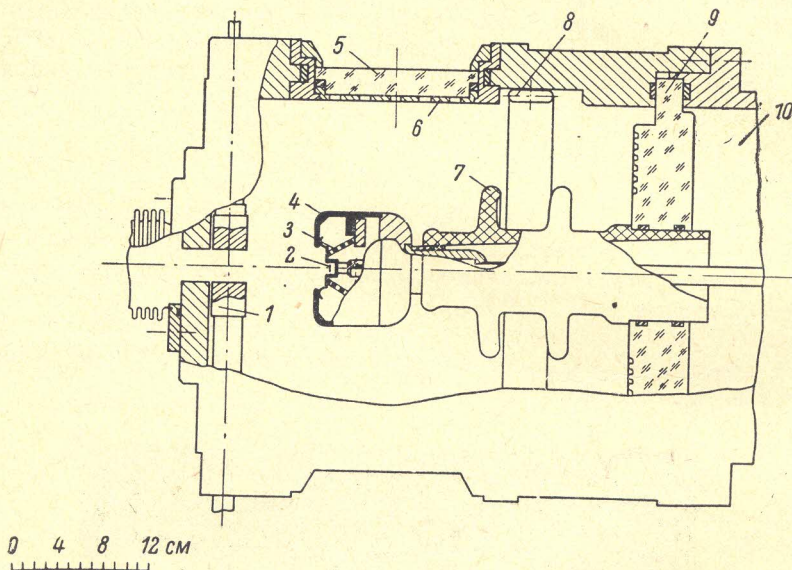


Рис. 3. Схематический чертеж вакуумной камеры инжектора.

1 — подвижный анод, перемещение которого обеспечивает поворот пучка в горизонтальной плоскости; 2 — катод; 3 — пружина; 4 — корпус съемного катодного узла; 5 — смотровое окно; 6 — металлический экран с отверстиями; 7 — фарфоровый изолятор; 8 — наивысшая азотная ловушка; 9 — изолятор из органического стекла; 10 — объем, наполненный трансформаторным маслом.

фокусирующая линза, состоящая из двух пар вертикальных прямолинейных проводов с противоположным направлением тока. Линза питается импульсным током ~ 3 ка при напряжении инжекции $W = 600$ кв. Инжектируемый электронный пучок имеет ленточную форму с угловой полушириной пучка в горизонтальной плоскости $\pm 4 \cdot 10^{-3}$ рад. Катодом инжектора служит танталовая лента $0.1 \times 3 \times 60$ мм с припеченной к ней танталовой пудрой, на которую с помощью биндера нанесен порошок гексаборида лантана LaB_6 .

Для амортизации гидравлических ударов, возникающих в формирующей линии при срабатывании разрядников, катод вместе с фокусирующим электродом подвешен на пружинах (рис. 3). Смена катодного узла осуществляется через смотровые окна 5, система клапанов обеспечивает осуществление этой операции без нарушения вакуума в камере ускорителя. При $W = 600$ кв и работающей линзе в камеру ускорителя можно вводить ток до 15 а.

Выбранная схема инжектора достаточно проста. Достоинством ее является также возможность получения больших (в сотни ампер) токов в импульсе. Максимальная величина W , при которой проводились испытания инжектора, составляла $\sim 10^6$ в. При этом большинство импульсов сопровождается скользящим электрическим разрядом в вакууме

по поверхности изолятора 7, обращенной к катоду инжектора (рис. 3). Эти разряды, не искажая сколько-нибудь заметным образом импульса инжекции, способствуют разрушению изолятора. Удовлетворительным является режим работы при $W=600$ кв. При этом напряжении изолятор 7 выдерживает не менее 10^4 импульсов, причем было установлено, что срок службы изолятора ограничивается постепенным его разрушением под действием частичных разрядов в толще диэлектрика (подробнее об этом явлении см., например, [8]).

При замене фарфорового изолятора 7 на полированный изолятор из органического стекла отчетливо видно постепенное „прорастание“ в толще изолятора ветвящихся науглероженных каналов, продвигающихся от потенциального электрода к корпусу коаксиальной линии. Изолятор 9, находящийся в более легких условиях, выдерживает не менее 10^5 импульсов.

Следует отметить, что срок службы изоляторов 7 и 9 может быть существенно увеличен как за счет более качественного изготовления изоляторов (в качестве изолятора 7 в настоящее время используется, например, стандартный изолятор из электротехнического фарфора), так и за счет их размещения в менее напряженных местах в несколько видоизмененных вариантах схемы формирования импульса инжекции. Недостатком выбранного инжектора является разброс напряжения инжекции от импульса к импульсу в пределах $\pm 3\%$, связанный со статистическим разбросом момента срабатывания неуправляемого разрядника, коммутирующего напряжение низкоомной питающей линии на основную формирующую линию.

Разработка инжектора велась под руководством Б. Г. Ерозолимского при участии Л. Н. Бондаренко и Г. И. Яснова.

5. Схема однооборотной инжекции

Поскольку при прочих равных условиях однооборотная инжекция в принципе позволяет снизить до минимума амплитуды бетатронных колебаний захваченных частиц, то можно было ожидать, что при наличии достаточно сильноточного инжектора предельный ток в ускорителе в этом случае будет заметно выше, чем при других способах инжекции. Ввиду малого времени оборота частиц в ускорителе ($\tau_0=10^{-8}$ сек.) осуществление однооборотной инжекции было связано с рядом технических трудностей, которые, однако, оказались преодолимыми.

Для однооборотного захвата электронов используется инфлектор 6 (рис. 1), электрическое поле которого выводит инжектируемые с внешнего радиуса частицы на равновесную орбиту. Инфлектор рассчитан на использование симметричного относительно камеры напряжения, которое подается от модулятора с импульсным трансформатором и имеет прямоугольную форму длительностью ~ 5 мксек. (рис. 6). После заполнения током всей камеры напряжение с инфлектора с помощью наносекундного разрядника, синхронизованного с инжектором, снимается за время $2 \cdot 10^{-9}$ сек. Точность синхронизации не хуже $1 \cdot 10^{-9}$ сек. Разрядник инфлектора запускается импульсом с емкостного датчика, который располагается в формирующей линии инжектора. Момент срабатывания разрядника регулируется длиной кабеля, передающего поджигающий импульс. Так как при $W=600$ кв разность потенциалов на инфлекторе, необходимая для оптимального захвата частиц, составляет всего 25 кв, то напряжение подавалось лишь на одну из пластин инфлектора. Азимутальная протяженность инфлектора равна 37° . Более подробное описание элементов схемы однооборотной инжекции дано в работе [6].

6. Высокочастотная система ускорителя

Ускорение частиц производится на первой гармонике одним резонатором. Для возбуждения резонатора используется частотномодулированный ВЧ генератор с выходной мощностью 300 кВт в импульсе. Генератор состоит из мощного (10 кВт) задающего генератора, собранного

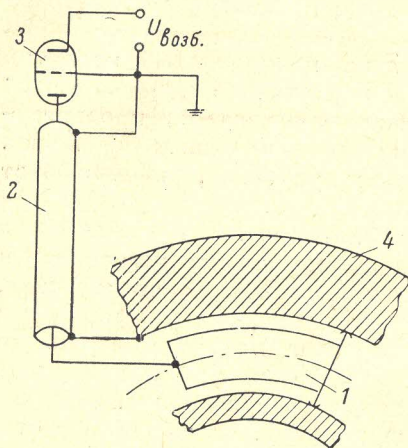


Рис. 4. Скелетная схема ускоряющей системы.

Пояснения в тексте.

на лампе ГИ-14Б и двухкаскадного усилителя на лампах ГИ-4А, расположенного в непосредственной близости от ускорителя. Модуляция частоты осуществляется путем подмагничивания колец из феррита 10ВЧ1, расположенных в анодном контуре задающего генератора. Усилитель ВЧ нагружен непосредственно на ускоряющий резонатор, который настроен на конечную частоту диапазона. На начальную частоту ускоряющее напряжение в $6 \div 8$ раз меньше, чем на конечной, что позволяет обходиться без дополнительной регулировки амплитуды, необходимой для достаточно эффективного захвата частиц в синхротронный режим.

Ускоряющий резонатор (рис. 4) разделен на две части: часть, расположенную в камере ускорителя 1, и короткий коаксиальный фидер 2, соединяющий камерную часть (которая и является собственно ускоряющим элементом) с анодом оконечного каскада усилителя ВЧ 3. Ускоряющее напряжение приложено между центральным электродом камерной части резонатора и стенками камеры ускорителя 4.

Основные параметры ВЧ системы следующие: начальная частота 103.5, конечная 116 Мгц; ускоряющее напряжение на начальной частоте 900, на конечной 6500 в, добротность резонатора $Q = 290$; электрическая длина резонатора $\frac{3}{4} \lambda$; стабильность начальной частоты $(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$.

7. Вспомогательные схемы и приборы

Управление всеми коммутирующими элементами осуществляется стандартным, разработанным в ИЯФ СО АН СССР, многоканальным генератором управляющих импульсов, который рассчитан на запуск тиратронов ТГИ-325/16. На основе этого тиратрона разработан генератор высоковольтных (до 15 кв) импульсов для поджига разрядников, используемых в электрических схемах ускорителя.

Для коммутации тока в различных импульсных схемах используются разрядники нескольких типов. В схеме однооборотной инжекции — высоковольтный быстродействующий разрядник на напряжение до 50 кв, для генератора импульсных напряжений — разрядники до 100 кв. Оба типа разрядников работают в атмосфере азота под давлением $\sim 10 \text{ кг/см}^2$. В ряде вспомогательных схем применяются разрядники с графитовыми электродами, работающие при атмосферном давлении. Основной разрядный контур коммутируется с помощью вакуумного разрядника.

Стабилизация величин импульсных токов осуществляется по зарядному напряжению накопительных емкостей. Напряжения стабилизированы с точностью, не меньшей чем $5 \cdot 10^{-3}$.

В камере ускорителя размещена система подвижных пробников, позволяющая исследовать поперечные размеры пучка на разных азимутах.

Некоторые пробники покрыты виллемитом для визуального наблюдения пучка через прозрачную верхнюю крышку ускорительной камеры. Для регистрации величины тока, попадающего на пробники, используются либо сцинтилляционные датчики γ -излучения с фотоумножителями (относительные измерения), либо измеряется непосредственно ток с пробника, а также полный заряд, сброшенный на пробник.

Сброс захваченного тока на пробник осуществляется введением первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля. Для этой цели с внутренней стороны кольца 1 (рис. 1) вплотную к стенке и к подводящей ток шине уложены два витка из медной фольги. Высота витков примерно равна высоте колец магнита. В момент сброса по виткам пропускается в противоположных направлениях импульсный ток и поле витков, складываясь в рабочем зазоре магнита с основным полем, сдвигает мгновенную орбиту на пробник.

Для измерения циркулирующего в ускорителе тока используется пояс Роговского. Сигнал с пояса подается на электронный интегратор. Чувствительность пояса по всему тракту составляет 5.6 в/а при постоянной интегрирования, равной $0.25 \cdot 10^{-3}$ сек.

8. Запуск и исследование работы ускорителя

Простота конструкции магнита и камеры синхротрона БСБ, а также хорошее качество магнитного поля обеспечили надежность работы этих основных элементов в процессе наладки машины, и в дальнейшем не потребовалось сколько-нибудь заметной их модернизации. Вместе с тем

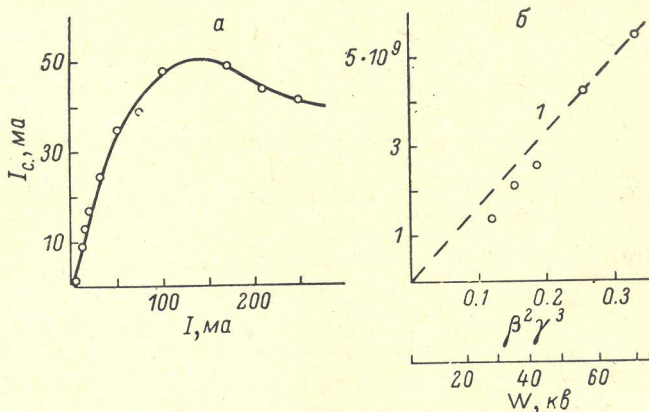


Рис. 5.

Кривая 1 дает зависимость $N_{пред} \sim \beta^2 \gamma^3$, пронормированную на экспериментальное значение $N_{пред}$ при $W = 70$ кв.

наладка ускорителя оказалась довольно сложным и трудоемким делом из-за новизны большинства технических задач, связанных с сильноточным питанием магнита, с высоковольтной инжекцией и однооборотным захватом. Кроме того, наличие большого количества различных сильноточных и высоковольтных импульсных схем, работающих при высокой скорости нарастания коммутируемых токов, привело к тому, что проблема подавления электромагнитных наводок стала одной из основных при наладке синхротрона. Как показал опыт работы, перечисленные выше трудности не являются принципиальными и были связаны в основном с недостаточной разработанностью соответствующей техники и с отсутствием опыта наладки аналогичных установок.

Отсутствие зависимости качества магнитного поля от его абсолютной величины, являющееся одним из преимуществ безжелезного магнита,

позволило использовать для предварительной наладки машины сравнительно низковольтную инжекцию при $W=70$ кв. Импульс напряжения инжекции имел прямоугольную форму длительностью $5 \div 10$ мксек. Однооборотная инжекция осуществлялась при этом путем снятия напряжения с инфлектора за время $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ сек. в один из моментов на плоской части импульса инжекции. Исследование захваченного пучка подтвердило хорошее качество импульсного магнитного поля в синхротроне. Все опыты при $W=70$ кв проводились в безускорительных режимах на квазипостоянном участке импульса поля. Сброс захваченных в этом режиме частиц на пробник осуществляется через время $t_* \geq 5$ мксек. после окончания импульса инжекции.

Качество инфлекторной системы характеризуют следующие данные. При малых токах инжекции отношение измеренного захваченного заряда к заряду, инжектированному за время оборота, составляет не менее 70%. (Эта величина занижена, поскольку не учитывается вторичная эмиссия и отражение электронов от пробника). При радиальном размере инжектируемого пучка 0.2 см и угловой расходимости $2 \cdot 10^{-3}$ рад. подавляющее число частиц имеет амплитуды „остаточных“ бетатронных колебаний $b < 2$ см, а $\sim 50\%$ частиц имеет $b < 1$ см при начальной амплитуде 6 см. Вертикальные размеры захваченного пучка не превышают ± 4 см.

Весьма существенным является вопрос о предельных токах в ускорителе. На рис. 5, а дана зависимость захваченного тока I_c от тока инжекции I при $W=70$ кв. Аналогичный характер эта зависимость имеет и при $W=600$ кв. Как известно, предельное число частиц N_* , которое ограничивается поперечным кулоновским взаимодействием частиц с полной энергией $E = E_0 + eW$, дается выражением

$$N_* = \frac{(\delta n) \pi a_0^2}{r_e R} \beta^2 \gamma^3, \quad (1)$$

где использованы обычно принятые обозначения и $r_e = \frac{e^2}{E_0} = 2.8 \cdot 10^{-13}$ см; $2a_0$ — эффективная апертура камеры; $\delta n = n - n_{\text{рез}}$ ограничивается ближайшим резонансом. Зависимость $N_* \sim \beta^2 \gamma^3$ в выражении (1) достаточно хорошо подтверждается на опыте (рис. 5, б). Однако имеется значительное расхождение (в $20 \div 30$ раз) величин заряда, измеренных на опыте Q_s и рассчитанных по (1). Для нашей установки при $a_0 = 3$ см, $R = 41$ см, $n = 0.4$, $\delta n = 0.15$ ($n_{\text{рез}} = 0.25$) расчет в соответствии с (1) захваченного тока I_c дает: при $W=70$ кв $I_c = 1a$; при $W=600$ кв $I_c = 45a$, в то время как измеряемые величины соответственно равны 50 ма (рис. 5, а) и 1.5 а.

Ряд дополнительных опытов и анализ продольного взаимодействия частиц (см. [9]), захваченных в камеру при однооборотной инжекции в виде одного сгустка, заполняющего $\frac{1}{q}$ часть окружности (или s сгустков, каждый протяженностью в $\frac{1}{q}$ часть окружности при s целом и $s \leq q$), показывает, что предельное число захваченных частиц N может значительно раньше, чем по (1), ограничиваться „собственными“ радиально-фазовыми колебаниями частиц в сгустках, причем расчет (9) для величины N дает¹

$$N = \frac{s \Gamma (1-n) \pi (a_0 - b)^2}{2 q r_e \Delta R} \beta^2 \gamma^3, \quad (2)$$

где

$$\Gamma = 1 - (1-n)(1-\beta^2) \quad (2a)$$

¹ Наличие сгустков частиц в камере можно было наблюдать с помощью пикап-электродов. В предварительных опытах ($W=70$ кв) обнаружена вторая гармоника ВЧ колебаний, соответствующая двум сгусткам в камере.

и $\Lambda = 1.5 \div 3$ (коэффициент, характеризующий установку); b — среднее (эффективное) значение амплитуды „остаточных“ бетатронных колебаний частиц после захвата; остальные обозначения прежние (при оценках $s = q$; $b = 0.5 a_0$; $\Lambda = 2$). Рассчитанные по (2) величины N всего лишь в 2.5 раза превышают данные опыта ($W = 70$ кв); это расхождение может быть обусловлено рядом причин, не учтенных при выводе (2), (см. [9]), и, таким образом, согласие с расчетом можно считать удовлетворительным. Следует отметить, что при $W = 600$ кв Q_3 превышает величину Q_0 , при $W = 70$ кв примерно в соответствии с (2). При этом отношение η величин захваченных токов, регистрируемых на опыте при $W = 600$ и 70 кв, $\eta \approx 30$, а

в соответствии с (2) должно быть $\eta \approx 40$. При оценке для $W = 600$ кв принималось $s = 1$, $q = 2$ (длительность плоского участка импульса инъекции равна $\sim 0.5 \tau_0$ (рис. 3) и $b = 0.5 a_0$. Однако возможно, что в действительности $s = q$, тогда расхождение будет примерно в два раза. Заметим, что появление электромагнитных помех от генератора импульсных напряжений при $W = 600$ кв искажает орбиту, уменьшая эффективное a_0 , и, возможно, увеличивает b . При $b = 1.5$ см уменьшение a_0 с 3 до 2.5 см может легко объяснить расхождение экспериментальных и расчетных величин η в два раза. Заметим, что в работе [10] приводятся интересные опытные данные, которые, вероятнее всего, также связаны с продольным взаимодействием частиц.

До сих пор рассматривались данные по однооборотной инъекции частиц в квазипостоянном магнитном поле. Схема полного рабочего цикла ускорителя представлена на рис. 6. Момент инъекции t_1 выбирается на квазипостоянном участке поля. До этого момента включается питание фокусирующей линзы в канале инжектора и напряжение на инфлектор. Режим захвата в синхротронное ускорение подбирался оптимальным для практически интересного случая предельно больших захваченных при инъекции в квазипостоянное поле токов. В результате экспериментов было установлено, что максимальная средняя величина и стабильность ускоренного тока достигаются при включении напряжения на резонатор после инъекции (момент t_2). Обычно из соображений удобства измерений выбиралось $t_2 - t_1 \approx 10$ мксек. В тот же момент t_2 включалась вспомогательная батарея, обеспечивающая предварительное ускорение частиц (с модулирующей частоты ВЧ напряжения) до момента t_3 , когда включается основная батарея конденсаторов. Предварительное ускорение идет до энергии $2 \div 3$ Мэв, причем $t_3 - t_2 = 400 \div 500$ мксек. Основное ускорение происходит в течение ~ 1.0 мсек. Сброс частиц на мишень осуществляется в момент t_4 выключением ВЧ напряжения резонатора и регистрируется по γ -излучению.

Максимальный захваченный в режим синхротронного ускорения ток,

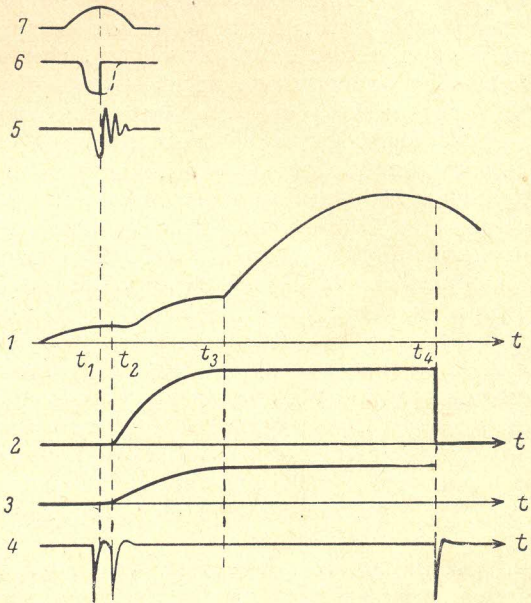


Рис. 6. Схема рабочего цикла ускорителя (масштабы не соблюдены).

1 — магнитное поле в ускорителе; 2 — ускоряющее напряжение на резонаторе; 3 — изменение частоты ускоряющего напряжения; 4 — импульсы γ -излучения; 5 — напряжение инъекции; 6 — напряжение на инфлекторе; 7 — магнитное поле фокусирующей линзы.

который удалось зарегистрировать, составляет около 250 ма ($\sim 1.5 \cdot 10^{10}$ частиц в импульсе), при этом для $W=600$ кв однооборотная инжекция в квазипостоянном поле дает ток ~ 1.2 а. Основываясь на имеющихся у нас в настоящее время экспериментальных данных, трудно судить, является ли полученный коэффициент захвата частиц в синхротронный режим ($\sim 20\%$) максимально возможным. Заметим, что вопрос о предельной интенсивности сложен и с трудом поддается расчету. На интенсивности могут сказываться различные эффекты: нарушение поперечной устойчивости, продольное взаимодействие частиц, отражение в стенках камеры, когерентное излучение, активные потери в стенках, возбуждение камеры, взаимодействие пучка с резонатором и т. д. Обычно оценка предельной интенсивности производится по поперечному эффекту объемного заряда [см. формулу (1)], и, как правило, расчетные значения оказываются значительно выше наблюдающихся экспериментально.

Приведенные выше данные по интенсивности пучка получены при эффективной радиальной апертуре $2 a_0 \approx 6$ см, при этом I_c практически не зависит от высоты инжектируемого пучка. Так как подавляющее большинство частиц имеет после захвата амплитуды бетатронных колебаний $b_0 < 2$ см и, по крайней мере, у половины частиц $b_0 < 1.5$ см, то при конечной энергии $E=130$ Мэв радиус пучка составляет ~ 0.15 см. При этом электронный пучок имеет параметры, необходимые для инжекции в накопитель ВЭП-1 (см. [3, 4]). Следует отметить, что для накопительных систем нестабильность величины тока в пучке синхротрона от импульса к импульсу не играет принципиальной роли, поскольку существенно лишь полное число частиц за весь цикл накопления. Поэтому недостаток примененного в синхротроне инжектора, имеющего нестабильность напряжения инжекции, также не является принципиальным и в значительной мере компенсируется простотой схемы инжектора и тем, что при тщательной настройке зазора основного разрядника инжектора ускоренный импульсный ток в худшем случае составляет $\sim 30\%$ от максимального. Заметим, что существенным образом стабильность и средняя интенсивность ускоренного тока могут быть увеличены за счет использования в синхротроне более высоковольтного (но вместе с тем и более сложного) инжектора, разработанного для синхротрона БЗ-М [3].

При имеющейся мощности выпрямителей 2×10 квт и конечной энергии 130 Мэв синхротрон дает один импульс в 30 сек. Используя предусмотренное в системе питания магнита водяное охлаждение, можно повысить частоту срабатывания ускорителя примерно на порядок, увеличив соответственно мощность питания.

Накопленный к настоящему времени опыт работы показывает, что использование миллисекундных импульсов тока амплитудой $\sim 10^6$ а для возбуждения одновиткового магнита с уравновешенным витком тока не встречает каких-либо серьезных технических затруднений. В процессе наладки ускорителя не было обнаружено заметных искажений поля, которые могли быть вызваны механическими усилиями в магните при прохождении токов $\sim 10^6$ а.

Система выпуска для синхротрона БСБ специально не разрабатывалась (и опыты по выпуску электронов не проводились), так как предполагалось использовать либо систему выпуска, разработанную для синхротрона БЗ-М [3], либо систему, разработанную для синхротрона Б2-С [3], успешно используемого в настоящее время в качестве инжектора на комплексе ВЭП-1 [3].

Заключение

Применение ускорителей типа синхротрона БСБ может быть рекомендовано прежде всего в тех случаях, когда не требуется высокой частоты повторения рабочих импульсов и когда желательна высокая импульсная интенсивность пучка, как это имеет место, например, при

использовании таких машин в качестве инжекторов для накопительных колец. Импульсный характер работы ускорителя при повторении импульсов раз в несколько секунд существенно упрощает требования, предъявляемые к элементам ускорителя по сравнению с машинами, предназначенными для работы с частотой $50 \div 60$ гц. Появляется возможность использования конструкционных материалов в более напряженных механических и электрических режимах, становится допустимым применение таких технологически удобных материалов, как органическое стекло, значительно снижается средняя мощность питания узлов ускорителя, открывается возможность широкого использования в электрических схемах машины разрядников различных типов, что позволяет по-новому решать технические задачи, связанные с инжекцией, ускорением и выпуском частиц. Все это позволяет резко снизить размеры, вес и трудоемкость изготовления таких ускорителей.

Перспективы использования безжелезных импульсных машин для ускорения частиц до более высоких энергий определяются главным образом энергоемкостью магнита. В этом смысле может оказаться весьма перспективной разработка безжелезных жесткофокусирующих вариантов магнита. Необходимость такой разработки диктуется также соображениями увеличения импульсной интенсивности ускорителя. Как следует из экспериментальных результатов, приведенных выше, предельный ускоренный заряд ограничивается продольным взаимодействием частиц (так называемым „эффектом отрицательной массы“). Оценки показывают, что ограничение этим эффектом наступает значительно раньше, чем из-за поперечных эффектов объемного заряда. Поэтому при жесткофокусирующих магнитах, когда эффект отрицательной массы отсутствует, можно рассчитывать на увеличение импульсной интенсивности в десятки раз по сравнению со случаем мягкой фокусировки.

В заключение авторы выражают благодарность А. А. Наумову за внимание и обсуждения, А. А. Нежевенко за организацию изготовления основных узлов ускорителя, а также А. И. Кондрахину, А. А. Лившицу и П. Г. Харченкову за участие в разработке отдельных узлов ускорителя.

Литература

- [1] Г. И. Будкер, А. А. Наумов. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, стр. 200. Изд-во АН СССР, М., 1956. — [2] Е. А. Абрамян, И. Е. Бендер, Г. И. Будкер, А. Х. Кадымов, А. А. Наумов, В. С. Панасюк. ЖТФ, XXXVI, 612, 1965. — [3] Е. А. Абрамян, И. Е. Бендер, Л. Н. Бондаренко, Г. И. Будкер, Г. Б. Глаголев, А. Х. Кадымов, Н. Г. Коньков, И. Н. Мешков, Ю. А. Мостовой, А. А. Наумов, О. А. Нежевенко, Г. Н. Острейко, В. Е. Пальчиков, В. С. Панасюк, В. В. Петров, С. Г. Попов, И. Я. Протопопов, Ю. И. Родионов, И. М. Самойлов, А. Н. Скринский, А. А. Соколов, И. Я. Тимошин, Л. И. Юдин. Тр. Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, стр. 1065, Атомиздат, М., 1964. — [4] Е. А. Абрамян, В. Л. Ауслендер, В. Н. Байер, Г. А. Блинов, Л. Н. Бондаренко, Г. И. Будкер, С. Б. Вассерман, В. В. Вячеславов, Г. И. Димов, Б. Г. Ерозолимский, А. В. Киселев, Л. С. Коробейников, Е. А. Кушниренко, А. А. Лившиц, Е. С. Миронов, А. А. Наумов, А. П. Онучин, В. С. Панасюк, В. А. Пападичев, С. Г. Попов, И. Я. Протопопов, С. Н. Родионов, В. А. Сидоров, Г. И. Сильвестров, А. Н. Скринский, В. С. Сынах, А. Г. Хабахпашев, Л. И. Юдин. Тр. Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, стр. 274. Атомиздат, М., 1964. — [5] А. Б. Нелидов, И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1535. — [6] Ю. А. Мостовой, И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1550. — [7] А. А. Лившиц, А. Б. Нелидов, И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1544. — [8] Л. А. Бибергель, Э. А. Наги, С. С. Соломоник. Кабели и провода для электронной аппаратуры. Изд-во „Энергия“, М., 1964. — [9] И. М. Самойлов, А. А. Соколов. ЖТФ, XXXVI, 2012, 1965. — [10] G. R. Lambertson. Тр. Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, стр. 153. Атомиздат, М., 1964.

Поступило в Редакцию
27 сентября 1965 г.