

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

В.В. Нейфельд, В.В. Петров  
ИНЖЕКТОР "ПОЗИТРОН" ДЛЯ ВЭПП4,  
ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ

ИЯФ 2015-15

Новосибирск  
2015



## Содержание

Предисловие .....	4
Введение.....	5
1. Немного истории.....	6
2. Позитронный инжектор на первом этапе его жизни .....	7
3. Выбор нового варианта позитронного инжектора.....	15
3.1. Проектный вариант получения позитронов .....	15
3.2. Рассматриваемые варианты получения позитронов.....	17
4. Современное состояние инжектора "Позитрон" .....	26
4.1. ЭЛИТ .....	28
4.2. Импульсный гирокон .....	34
4.3. Линейный ускоритель .....	40
4.4. Конверсионная система.....	49
4.5. Электронно-оптический канал ЛУ – Б4.....	51
4.6. Синхротрон Б-4 .....	53
4.6.1. Система питания Б-4.....	53
4.6.2. ВЧ генератор.....	55
4.6.3. Впуск .....	57
4.6.4. Выпуск.....	57
4.6.5. Коррекция орбиты.....	58
4.6.6. Пробники Б-4.....	59
4.6.7. Датчик тока пучка Б4 (пояс Роговского) .....	59
5. Модернизация инжектора "Позитрон".....	61
Заключение .....	62
Литература.....	63

## Предисловие

В предлагаемом обзоре делается попытка вкратце объединить всю информацию, относящуюся к работе по созданию и эксплуатации инжектора для ВЭПП4, которая проводилась в течение последних пятидесяти лет.

В работе по инжектору для ВЭПП4 принимал участие большой коллектив сотрудников института: лабораторий, конструкторского бюро, экспериментального производства, вспомогательных служб. Всех невозможно упомянуть. Можно назвать лишь некоторых, и это далеко не полный список.

Сама идея создания "железно-безжелезного" электромагнита синхротрона, а также гирокона, мощного СВЧ генератора, принадлежит Г.И. Будкеру, основателю и бессменному руководителю института в течение почти двадцати лет.

Руководители лаборатории встречных пучков И.Я. Протопопов, Г.М. Тумайкин вложили много сил в изготовление и обеспечение работоспособности инжектора.

С самого начала работами по разработке, созданию и эксплуатации инжектора руководили В.В. Петров, А.В. Филипченко, Г.И. Яснов.

Расчет конверсии при энергиях  $20 \div 70$  МэВ, подтвердивший необходимость модернизации инжектора, выполнили Б.В. Чириков, В.А. Таюрский.

Активно участвовал в разработке нового варианта инжектора Р.А. Салимов.

В конструировании установки решающее участие принимали Г.А. Корнюхин, Г.С. Крайнов, А.А. Лившиц, Ю.В. Маклаков, Ю.А. Немков, Б.З. Персов, Э.М. Трахтенберг, В.Г. Ческидов и другие.

Создание форинжекторов – ускорителей ЭЛИТ – несомненная заслуга С.Б. Вассермана и его сотрудников И.И. Глазкова, Е.Н. Кокина, В.М. Радченко.

Изготовление электронных пушек обеспечивали Г.И. Кузнецов, Ю.Я. Чибуков.

Радиотехнические работы по разработке, созданию и эксплуатации инжектора, как на первом, так и на втором этапе его жизни выполняли сотрудники лаборатории М.М. Карлинера: И.И. Авербух, А.С. Калинин, Е.В. Козырев, Э.А. Купер, И.Г. Макаров, В.И. Нифонтов, О.А. Нежевенко, Г.Н. Острийко, А.Д. Панфилов, Г.В. Сердобинцев и другие.

Многочисленные системы импульсного электропитания изготавливали и эксплуатировали О.П. Гордеев, А.Ф. Серов, Е.Н. Харитонов с сотрудниками.

Наносекундные системы впуска-выпуска изготавливали и эксплуатировали О.В. Анчугов, Б.И. Гришанов.

Электронно-оптические каналы, обеспечившие возможность получения позитронов после выпуска электронов из синхротрона с последующим перепуском в ВЭППЗ создавались в лаборатории Г.И. Сильвестрова при активном участии Т.А. Всеволожской, Л.Л. Данилова, В.А. Киселева, В.Н. Пакина.

Много и эффективно работали на сборке и эксплуатации комплекса механики под руководством А.А. Ларионова и В.М. Шинелева.

На всех этапах большой вклад в бесперебойную работу инжектора внесли инженеры-операторы А.Н. Ворошилов, П.А. Дурнов, Ю.М. Глуховченко, С.Е. Карнаев, А.В. Кожемякин, В.И. Купчик, В.В. Нейфельд, В.К. Сандырев, В.И. Сербин.

Авторы просят прощения, если кто-то не найдет своей фамилии среди упомянутых. Это не злой умысел, а просто дефект человеческой памяти.

## ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс ВЭПП-4 [1] представляет собой уникальную установку для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками высоких энергий. Схема комплекса представлена на рис. 1. В настоящее время комплекс ВЭПП-4 включает в себя линейный ускоритель (ЛУ, энергия пучка – до 50 МэВ), бустерный синхротрон (Б4, энергия 350 МэВ), накопители ВЭПП3 (до 2 ГэВ) и ВЭПП4 (до 6 ГэВ), а также универсальный детектор КЕДР с магнитным полем до 1 Тл в объеме  $21.6 \text{ м}^3$ , создаваемым сверхпроводящим соленоидом.

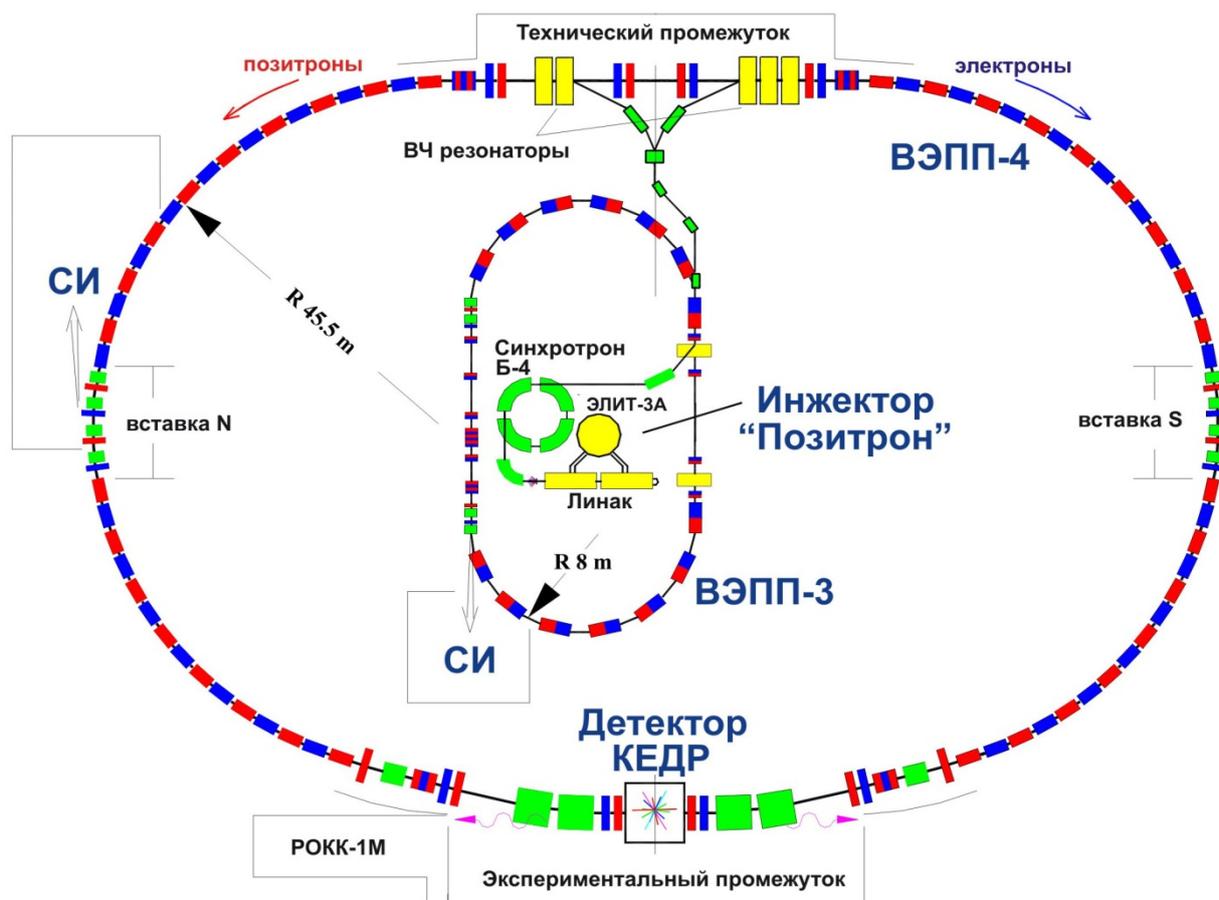


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса ВЭПП4.

Основное назначение коллайдера ВЭПП4М – экспериментальное изучение свойств элементарных частиц, параметров резонансов и сечений процессов электрон-позитронной аннигиляции. Несмотря на относительно невысокую светимость по сравнению с современными коллайдерами, ВЭПП4М с детектором КЕДР обладает рядом преимуществ, позволяющих проводить уникальные эксперименты по физике высоких энергий.

В проектном варианте комплекса для инжекции была создана каскадная схема, включавшая в себя линейный ускоритель ЭЛИТ-3, синхротрон Б4 и накопительное кольцо ВЭПП3, которое стало играть роль бустера. После 1977 года получение позитронов было обеспечено созданием оригинального сильноточного электронного ускорителя на энергию до 50 МэВ, на выходе которого путем конверсии электронов производился позитронный пучок для последующего ускорения в синхротроне.

## 1. Немного истории

"Жизнь" инжектора электронов и позитронов для ВЭППЗ/ВЭПП4 разделяется на два больших периода:

- 1) 1966 ÷ 1977 гг. – создание электронного синхротрона Б4 с инжекцией электронов из ЭЛИТ-3 и получением позитронов конверсией выпущенного из Б4 пучка в канале Б4–ВЭППЗ ( $450e^-/250e^+$ ) с последующей инжекцией электронов/позитронов в ВЭППЗ; проведение настройки и экспериментов на ВЭППЗ и ВЭПП4.
- 2) С 1977 и по настоящее время – создание и работа нового позитронного инжектора на основе ЭЛИТ-3А, импульсного гирокона и линейного ускорителя (ЛУ) с получением 7-МэВных позитронов/электронов на выходе ЛУ с последующим их ускорением в Б-4 до 350 МэВ и инжекцией в ВЭППЗ. Проведение экспериментов на ВЭППЗ и ВЭПП4.

Назовем некоторые узловые точки по времени.

Обсуждение параметров и конструкции синхротрона Б4	конец 1966
Первый выпуск в Б4 (энергия ЭЛИТ – 1.2 МэВ)	05.08.1969
Захват электронов в ВЭППЗ	08.05.1970
Первые позитроны в ВЭППЗ (захват)	20.09.1972
Накопление позитронов в ВЭППЗ, получены 2 пучка ( $e^-$ и $e^+$ )	08.1974
Решение срочно начать опыты по обнаружению $\psi$ -мезона, даже при низкой светимости ( $\leq 10^{28}$ )	12.1974
Первая запитка кольца ВЭПП4 током 4 кА	12.1976
Захват электронов в ВЭПП4 ( $E = 1.35$ ГэВ, время жизни 1 час)	09.06.1977
Остановка для монтажа нового позитронного источника	25.07.1977
Первое включение ЭЛИТ-3А (новый позитронный источник)	29.04.1978
Первый выпуск электронов в Б4	12.08.1978
Захват и ускорение электронов в ВЭППЗ с новым позитронным источником ( $E = 1.8$ ГэВ, захват в позитронном направлении)	09.04.1979
Ускорение позитронов в Б4 ( $E^+ = 350$ МэВ, $I_{\text{ускор}}^+ \approx 300$ мкА)	29.04.1979
Выпуск позитронов из Б4 и накопление в ВЭППЗ	19.05.1979
Захват позитронов в ВЭПП4	02.07.1979
Получены два пучка в ВЭПП4	14.11.1979
Эксперимент по прецизионному измерению масс $\psi$ - и $\psi'$ - мезонов	03–04.1980
Получен пучок электронов в ВЭПП4 с энергией 5 ГэВ	20.03.1981
Подняты два пучка до $E = 4.7$ ГэВ (ограничение – по допустимому полю в МД-1 с неисправными катушками). Зарегистрирована светимость $\sim 2 \cdot 10^{26}$ (токи $\sim 250 \times 250$ мкА)	10.07.1981
Первое наблюдение ипсилон-мезона ( $\Upsilon$ ) в ВЭПП4	30.04.1982
Пожар в 13 здании на ВЭПП4	15.08.1985
ВЭППЗ восстановлен после пожара	03.1986
Синхротронный захват электронов в ВЭПП4М ( $E=1.8$ ГэВ)	27.11.1991
Первый пси-мезон ( $\psi$ ) в ВЭПП4 после пожара	14.04.1998

## 2. Позитронный инжектор на первом этапе его жизни

Работы по проектированию инжектора были начаты в 1966 г. К середине 1968 г. основные узлы были готовы и начата сборка синхротрона. В мае 1969 г. осуществлен запуск инжектора синхротрона – линейного ускорителя ЭЛИТ-3, в августе 1969 г. произведен выпуск электронов в Б-4, а в январе 1970 г. получен выпущенный пучок [2].

На первом этапе необходимо было получить выпущенный пучок с параметрами, обеспечивающими проверку всех систем накопителя ВЭППЗ. Работы на синхротроне велись, практически, параллельно с созданием ВЭППЗ, что в значительной мере определило результаты, полученные на первом этапе.

При создании синхротрона Б-4 был учтен опыт работы на синхротроне Б-3М [3, 4]. Вначале предполагалось применить в синхротроне однооборотную инжекцию из импульсного линейного ускорителя, тем более, что такой ускоритель с энергией электронов 3.5 МэВ и током до 100 А в импульсе имелся в институте и использовался для получения позитронов [5, 6]. Однако опыты на синхротроне Б-3М показали, что однооборотная инжекция из этого ускорителя имеет ряд недостатков [7]. Во-первых, пучок с нужным энергетическим разбросом  $\pm 0.5\%$  имел длительность 15 нс и заполнял только половину камеры по азимуту, и, во-вторых, на каждом азимуте имелись частицы только одной энергии. Обе эти причины могли ограничивать захватываемый ток из-за неустойчивостей в пучке. Поэтому было принято решение использовать многооборотную инжекцию для обеспечения азимутальной однородности пучка при захвате, а также применить бетатронное ускорение после инжекции до 8 МэВ.

Блок-схема установки на первом этапе, включая собственно инжектор ЭЛИТ-3, синхротрон Б4 и все остальные элементы, необходимые для впуска, захвата, ускорения, выпуска частиц, представлена на рис. 2.

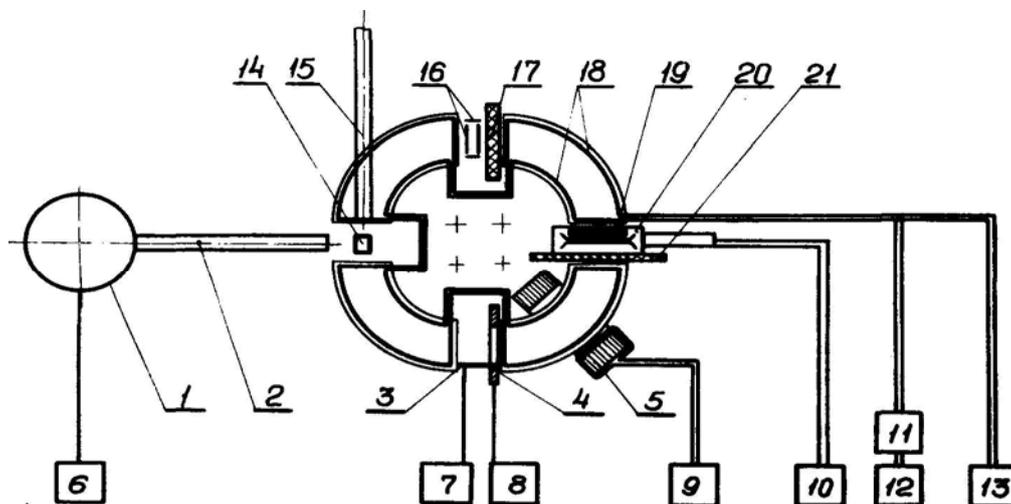


Рис. 2. Блок-схема инжектора "Позитрон" на первом этапе его работы.

1 – ЭЛИТ-3; 2 – электронно-оптический канал ЭЛИТ-3 – Б4; 3 – дефлектор; 4 – сердечник накопления; 5 – бетатронный сердечник; 6 – зарядное устройство ЭЛИТ-3; 7 – генератор дефлектора; 8 – генератор сердечника накопления; 9 – генератор бетатронного сердечника; 10 – В.Ч. генератор; 11 – импульсный трансформатор; 12 – генератор основного поля; 13 – генератор поля инжекции; 14 – выпускной магнит; 15 – выпускной канал; 16 – ёмкостные датчики; 17 – индукционные датчики; 18 – токоведущие шины; 19 – отклоняющий магнит; 20 – резонатор; 21 – изолятор.

Инжектором синхротрона Б4 являлся ЭЛИТ-3 – ускоритель на основе трансформатора Тесла [8, 9, 10]. Блок-схема такого ускорителя приведена на рис. 3.

Ускоритель работал следующим образом. Конденсатор  $C_1$  заряжался от стабилизированного с точностью до 0.1% выпрямителя до напряжения  $U_{01}$ . В момент максимума поля инжекции в синхротроне система синхронизации включала коммутатор "К" и в связанных контурах  $L_1C_1$  и  $L_2C_2$  возникали колебания.

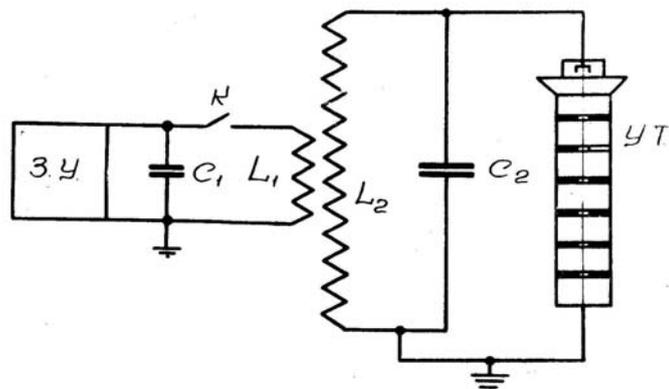


Рис. 3. Блок-схема ЭЛИТ-3.

З.У. – зарядное устройство;  $C_1$  – емкость первичного контура;  $L_1$  – первичная обмотка;  $K$  – коммутатор;  $L_2$  – вторичная обмотка;  $C_2$  – конструктивная емкость; П – электронная пушка; УТ – ускорительная трубка.

Для того чтобы энергия пучка за время инжекции изменялась не более чем на 0.5%, собственная частота контуров была выбрана равной  $f_0 = 35$  кГц.

Основные параметры контуров:  $C_1 = 4.2$  мкФ;  $L_1 = 5.5$  мкГн,  
 $C_2 = 150$  пФ;  $L_2 = 195$  мГн;

Коэффициент связи контуров  $k = 0.385$ .

При рабочем напряжении  $U_{01} = 25$  кВ на вторичной обмотке развивалось напряжение до 3 МВ. Секционированная ускорительная трубка из керамики 22ХС была включена параллельно вторичному контуру. Трансформатор, образованный контурами, вместе с ускорительной трубкой помещены в стальной бак диаметром 1200 мм и высотой 2300 мм. В качестве изолирующего газа применялся элегаз ( $SF_6$ ) под давлением до 12 атм.

В трансформаторном режиме (без ускорительной трубки) при давлении 7 атм. было получено напряжение 4 МВ. Инжекция производилась при  $U_2 = 2$  МВ. Максимальный импульсный ток  $I_{\text{макс}} = 3$  А при  $\tau = 1.5$  мкс, что соответствует  $3 \cdot 10^{13}$  частиц/имп. Ток пучка мог изменяться в соответствии с требованиями эксперимента. Электронная пушка управлялась модулятором, который запускался световым импульсом от лампы ИСШ-15. Питание модулятора и накал пушки подводились по вторичной обмотке, которая для этого намотана двумя параллельными проводами.

Пучок из инжектора выходил вниз; для перевода пучка в синхротрон требовалось произвести два поворота на  $90^\circ$  в разных плоскостях [2]. Из-за энергетического разброса частиц происходило искажение фазового объема пучка, поэтому была рассчитана ахроматическая система транспортировки пучка. Каждый поворот на  $90^\circ$  осуществлялся двумя магнитами с согласующей линзой между ними. Для согласования двух этих поворотов была применена третья линза. Такая оптическая система могла обеспечить транспортировку пучка с различным увеличением по углу или координате.

Так как по оценкам фазовый объем пучка, получаемого из инжектора, мог быть сделан равным фазовому объему, захватываемому в синхротрон на каждом обороте, то система была сделана с увеличением, равным 1. Поэтому каждый поворот на  $90^\circ$

осуществлялся двумя магнитами по  $45^\circ$ . Для поворота использовались одновитковые магниты с равновесным радиусом  $R_0 = 80$  мм, апертурой  $12 \times 12$  мм и показателем спада поля  $n = 0.5$ , а для фокусировки – сдвоенные аксиально-симметричные линзы. Питание магнитов и линз импульсное.

Блок-схема электронно-оптического канала. ЭЛИТ-3 – Б4 приведена на рис. 4.

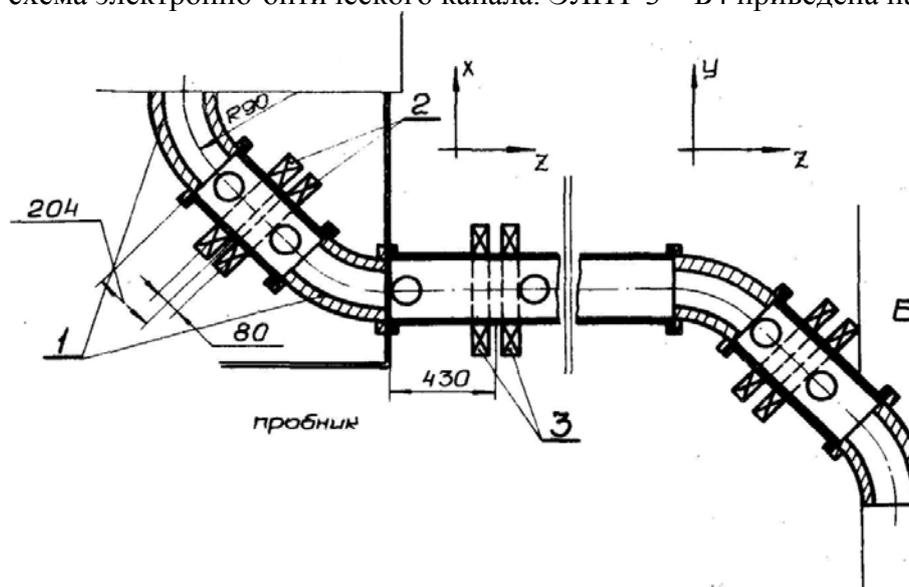


Рис. 4. Электронно-оптический канал ЭЛИТ-3 – Б4.

1 – поворотные магниты; 2, 3 – согласующие аксиально-симметричные линзы.

Конструкция электромагнита синхротрона являлась логическим продолжением работ по созданию железно-безжелезных магнитов в ИЯФ [11, 12, 13, 14]. Такая конструкция обеспечивает минимальные поля рассеяния при максимальном использовании магнитного поля по всему объему.

Магнитная система синхротрона состоит из четырех С-образных магнитов ( $R_0 = 102$  см) азимутальной протяженностью по  $88^\circ$  каждый с четырьмя прямолинейными промежутками по 40 см между ними. Поперечное сечение электромагнита приведено на рис. 5.

Магнитное поле создается током, протекающим по наружной (14) и внутренней (6) шинам в противоположных направлениях. Основной магнитный поток замыкается по шихтованному магнитопроводу (2), вклеенному эпоксидным компаундом в вакуумноплотный кожух (1) из нержавеющей стали. Магнитопровод собран из блоков азимутальной протяженностью около 200 мм. Блоки изготовлены из листов стали Э43 толщиной 0.5 мм, склеенных эпоксидным компаундом. Между блоками размещены прокладки (3) из стеклотекстолита СТЭФ толщиной 15 мм. Благодаря скосам в прокладках, апертура магнитопровода сообщается, помимо торцов квадрантов, с форкамерой (4), через которую производится откачка. Сквозь эти прокладки проходят шпильки (12), крепящие внутреннюю шину к магнитопроводу через изоляторы (5). Сквозь эти же прокладки в каждом квадранте проходят выводы витков (13) вокруг обратного ярма магнитопровода, использующихся для радиальной коррекции орбиты на инжекции и перед выпуском.

Наружная шина крепится к кожуху болтами (7). Посадочные поверхности для шин, а также полюса проточены на карусельном станке с одной установки после изготовления магнитопровода. Для устранения замыканий между листами железа в результате обработки на станке корпус вместе с блоками протравлен в смеси серной, азотной и соляной кислот с последующей нейтрализацией и промывкой.

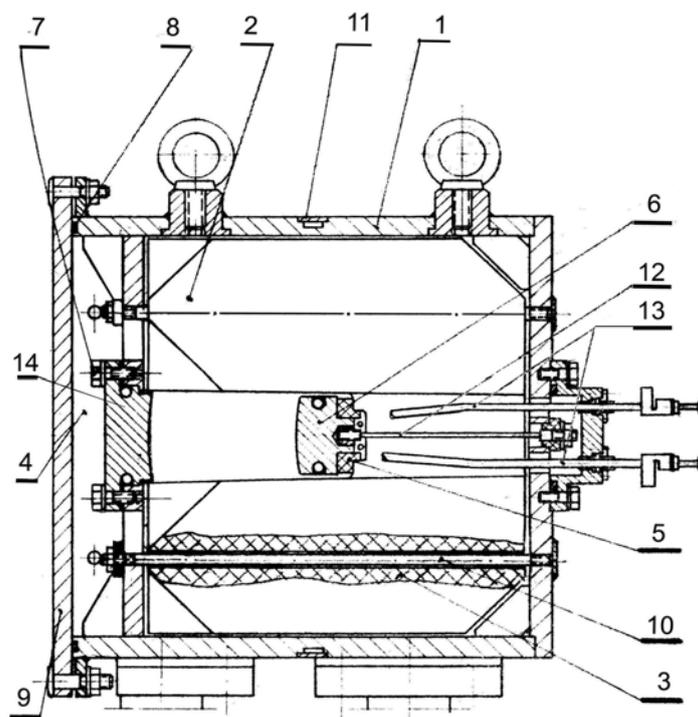


Рис. 5. Поперечное сечение электромагнита синхротрона.

1 – вакуумный кожух; 2 – блок магнитопровода; 3 – прокладка между блоками; 4 – форкамера; 5 – изолятор между внутренней шиной и магнитопроводом; 6 – внутренняя шина; 7 – болт крепления наружной шины к корпусу; 8 – болт крепления наружной крышки корпуса; 9 – наружная крышка корпуса; 10 – шпилька дополнительного крепления наружной шины; 11 – канал водяного охлаждения корпуса; 12 – шпилька крепления внутренней шины к корпусу; 13 – витки радиальной коррекции орбиты; 14 – наружная шина.

Магнит синхротрона – слабофокусирующий. Необходимая форма магнитного поля (показатель спада  $n = 0.4$ ) обеспечивается как наклоном полюсов, так и профилем шин (6) и (14). Для окончательной корректировки показателя спада поля и положения орбиты по радиусу и высоте во время инжекции и при выпуске на поверхности полюсов укреплены специальные витки.

Для устранения азимутального короткозамкнутого витка, образованного вакуумным кожухом синхротрона, применена специальная изоляционная прокладка на торце одного из квадрантов.

Использование внешнего кожуха делает магнит надежным механически, а кроме того позволяет, отказавшись от отдельной вакуумной камеры, полностью использовать весь объем магнитного поля для ускорения частиц. Несмотря на большое количество эпоксидной смолы в вакуумном объеме, пять диффузионных насосов Н5-С с азотными ловушками, обеспечивали вакуум  $10^{-5}$  Торр.

Весь цикл ускорения можно условно разделить на несколько этапов.

На первом этапе электроны с энергией 2 МэВ, амплитудой тока 3 А и длительностью импульса 1.5 мкс из линейного ускорителя ЭЛИТ-3 через электронно-оптический канал впускались в прямолинейном промежутке синхротрона вблизи наружного радиуса вакуумной камеры при квазипостоянном магнитном поле.

Квазипостоянное магнитное поле инжекции формировалось током от отдельного генератора. Синусоидальные импульсы тока стабилизированы с точностью 0.1%. Кроме стабилизации тока от импульса к импульсу в схеме была предусмотрена медленная стабилизация, предотвращающая изменения тока из-за температурных нестабильностей элементов.

В синхротроне была применена многооборотная инжекция, позволявшая получить однородный по азимуту пучок с большим энергетическим разбросом [2]. Величина магнитного поля инжекции выбиралась так, чтобы равновесная орбита инжектируемых частиц находилась вблизи "ножа" впускного магнита и амплитуда бетатронных колебаний была мала. Из-за разности частот обращения и бетатронных колебаний ( $\nu_r = 0.87$ ) частицы обходили "нож" в течение нескольких оборотов.

Одновременно с инжекцией включался импульсный сердечник накопления, расположенный в одном из прямолинейных промежутков синхротрона. Под действием тормозящего вихревого поля, создаваемого сердечником накопления, частицы изменяли энергию и, двигаясь по сворачивающейся спирали, отходили от "ножа", заполняя в течение нескольких оборотов всю камеру. При таком способе инжекции пучок непрерывен по азимуту и имеет значительный (до 6%) энергетический разброс частиц, что уменьшает возможность появления некоторых неустойчивостей.

Расчёт показывал, что максимальное количество частиц захватывалось при шаге спирали 2 мм и расстоянии от наружной шины до равновесной орбиты в момент инжекции 3 см (рис. 6).

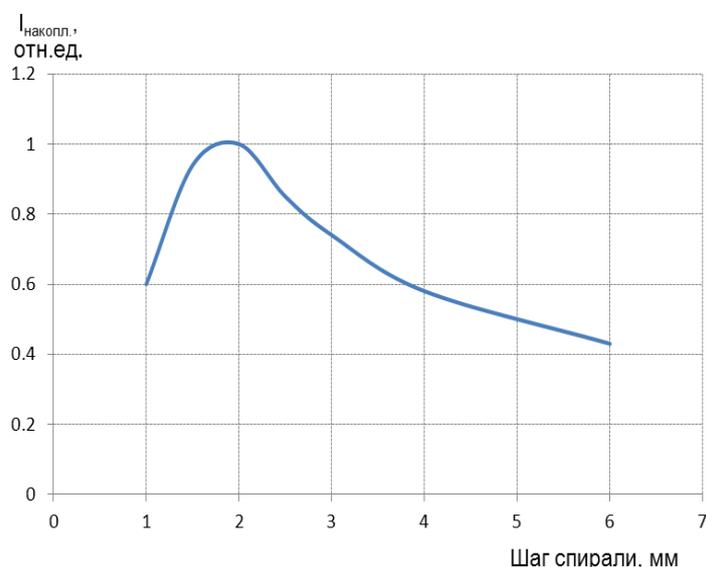


Рис. 6. Зависимость накопленного тока от шага спирали.

При энергии инжекции 3 МэВ для получения такого шага спирали сердечник накопления должен был обеспечивать напряжение на обходе 5 кВ. Оптимальное время инжекции 1.5 мкс. В этом случае с каждого оборота захватывались частицы в интервале координат  $\pm 0.6$  см и углов  $\pm 7 \cdot 10^{-3}$  радиана при общем радиальном наклоне пучка к наружной шине  $+ 8 \cdot 10^{-3}$  радиана.

Формирование прямоугольного импульса амплитудой до 5 кВ и длительностью до 1.5 мкс осуществлялось путем разряда гиперболической линии с сосредоточенными параметрами на трехвитковую обмотку сердечника накопления, шунтированную активным сопротивлением [15]. Основным коммутирующим элементом служил тиратрон ТГИ1-2000/35. Для формирования крутого заднего фронта использовался тиратрон ТГИ 1-1000/25, который запускался через линию задержки тем же импульсом, что и основной тиратрон. После того, как гиперболическая линия разрядилась, ток в обмотке сердечника продолжал течь в том же направлении, и возникал импульс напряжения отрицательной полярности. Для подавления этого импульса использовался тиратрон ТГИ 1-700/25. Высоковольтный выпрямитель, заряжающий линию до напряжения 25 кВ, собран на кенотронах В1-01/40.

На втором этапе, сразу же после окончания накопления, электроны ускорялись в бетатронном режиме до энергии 8 МэВ для того, чтобы уменьшить потери при захвате в синхротронный режим. Ускоряющая вихревая ЭДС создавалась бетатронным сердечником, охватывающим один из квадрантов электромагнита и питающимся от отдельного генератора.

Точное согласование ускоряющего напряжения с напряжением на шинах электромагнита обеспечивалось благодаря параллельному включению обмотки сердечника с магнитом и питанию их от общего генератора. Последовательно с магнитом включалась дополнительная индуктивность, с помощью которой подстраивалось положение радиуса стягивания пучка в процессе бетатронного ускорения. После того, как ток в обмотке бетатронного сердечника достигал максимума, она закорачивалась посредством отдельного вентиля, благодаря чему ток в обмотке спадал за длительное время ( $\sim 1$  мс), и напряжение обратного знака, тормозящее электроны, оказывалось пренебрежимо малым.

Для более полного использования железа бетатронного сердечника он подмагничивался импульсным током, длительность которого много больше, чем длительность бетатронного ускорения. Чтобы ток подмагничивания не создавал в синхротроне магнитного поля, противоположного рабочему, в схему был включен диод.

После окончания второго этапа, в конце бетатронного ускорения, включалось основное поле и ВЧ генератор.

Все четыре квадранта электромагнита синхротрона включены последовательно. Для получения ведущего магнитного поля при конечной энергии электронов 500 МэВ, с учётом насыщения железа электромагнита требуется ток  $I \approx 140$  кА. Накопительная емкость, состоящая из двух батарей по  $15 \cdot 10^3$  мкФ, включенных последовательно, заряжалась до напряжения 7 кВ. Через коммутаторы, состоящие из 144 тиристоров Т-150, накопительная ёмкость разряжалась на первичную обмотку импульсного трансформатора, с вторичной обмотки которого напряжение подавалось на тоководущие шины магнита синхротрона. При коэффициенте трансформации  $K = 4$  во вторичной цепи формировался полусинусоидальный импульс тока, амплитуда которого  $I_0 = 140$  кА, длительность  $T = 4$  мс. В разрядную цепь были включены насыщающиеся дроссели, магнитные свойства которых подобраны таким образом, чтобы обеспечить плавное нарастание напряжения на электромагните синхротрона. Для устранения выбросов напряжения при включении коммутаторов служили корректирующие R C L-цепи.

Длинный "хвост" тока противоположной полярности с постоянной времени большей, чем время между импульсами, влияющий на амплитуду и форму поля инжекции, обрезался включенным в разрядную цепь специальным диодным блоком.

Коммутируемая импульсная мощность достигала сотен мегавольтампер, поэтому в схеме генератора была предусмотрена рекуперация энергии, которая осуществлялась перехватывающими цепями, состоящими из 90 диодов типа ВЛ-100 каждая и включенных последовательно с ними насыщающихся дросселей.

Ускорение электронов до максимальной энергии производилось на второй гармонике частоты обращения ВЧ электрическим полем резонатора, расположенного в одном из прямолинейных промежутков. Резонатор представлял собой симметричную конструкцию, составленную из двух коаксиальных линий, нагруженных конденсаторами, которые образованы дисками.

Резонатор соединялся с камерой ускорителя с помощью фланцев с плавающими уплотнениями, что облегчало его установку. Все вводы в резонатор были выполнены с помощью фланцевых соединений, расположенных по окружности резонатора. Изоляторы вводов были изготовлены из фторопласта, уплотнения – из вакуумной резины.

Резонатор был шунтирован внешними нагрузками (сопротивления УВ1-20, охлаждаемые маслом) до значения добротности  $Q = 200$ . Это давало возможность, не расстраивая резонатор, удерживать при захвате в синхротронный режим токи порядка нескольких ампер. Связь нагрузок с резонатором – ёмкостная и выполнена внутри резонатора в виде согласованной полосковой линии, что обеспечивало шунтирование резонатора до более высоких частот, увеличивая устойчивость движения сгустков. С этой же целью была предусмотрена возможность изменять длину подводящего фидера.

Подстройка резонатора производилась конструктивным конденсатором, обеспечивающим перестройку частоты в диапазоне  $\pm 1.5\%$ . Напряжение на резонаторе измерялось специально откалиброванной петлей, нагруженной на согласованное сопротивление 75 Ом.

Для подавления резонансного вакуумного разряда (РВР) в резонаторе была предусмотрена подача на все элементы вводов и конденсатор подстройки отрицательного напряжения – 2 кВ. Зазор ускоряющего промежутка был выбран таким, чтобы условия возникновения в нём РВР не выполнялись.

В модуляторе фронта напряжения ВЧ с помощью специальной активной и пассивной схемы формировался начальный участок импульса, обеспечивавший получение на ускоряющем зазоре резонатора огибающей ВЧ напряжения, соответствующей требованиям наилучшего захвата в синхротронный режим и последующего ускорения без потерь.

Коэффициент захвата электронов в синхротронный режим оказывался близким к единице, т.к. в результате бетатронного ускорения пучок, заполнявший после инъекции всю камеру по радиусу, сжимался, освобождая место для синхротронных колебаний, возникающих после включения ВЧ.

Во время работы синхротрона возникает необходимость коррекции орбиты электронного пучка по радиусу и по вертикали, а также изменения показателя спада поля  $n$  на этапах инъекции и выпуска. Для этого использовались витки, укрепленные на полюсах магнитов, и шины, охватывающие часть блоков магнита.

Коррекция орбиты и  $n$  на этапе инъекции производилась введением в корректирующие цепи сигнала, форма которого повторяла форму магнитного поля в синхротроне. Сигнал формировался схемой, в которой суммировались токи, создающие квазипостоянное поле инъекции и бетатронного режима. Усилители мощности были выполнены на транзисторах и обеспечивали токи в цепях Z– и R–коррекции до 15 ампер, а в цепях  $n$ –коррекции до 40 ампер.

Коррекция орбиты при выпуске производилась введением в корректирующие цепи импульса тока синусоидальной формы, синхронизированного с моментом выпуска. Амплитуда тока в витках выпускной R–коррекции 600 А, в витках Z– и  $n$ –коррекции – 300 А. Длительность импульса – 400 мкс.

На четвертом этапе производился однооборотный выпуск частиц из ускорителя.

Выпуск ускоренных электронов производился по вертикали в течение одного оборота. ВЧ напряжение выключалось на спадающем участке импульса магнитного поля. При дальнейшем уменьшении поля радиус равновесной орбиты увеличивался, и пучок попадал в дефлектор, расположенный в прямолинейном промежутке, вблизи наружной стенки камеры. Окно выпускного канала находилось в следующем за дефлектором прямолинейном промежутке около верхнего полюса магнита, вплотную к наружной шине.

Пластины дефлектора являлись отрезками полосковых линий, согласованных на конце. Рабочая апертура дефлектора  $\Delta Z \times \Delta R = 10 \times 16 \text{ мм}^2$ . Зарядное напряжение генератора до 65 кВ. Для уменьшения заброса пучка дефлектором одновременно с расширением орбиты происходило искажение медианной плоскости по вертикали таким образом, чтобы орбита перед выпуском была вблизи "ножа" выпускного магнита.

Такое искажение осуществлялось с помощью короткого (в азимутальном направлении) магнита в прямолинейном промежутке, диаметрально противоположном выпускному. Толщина магнита 2.5 см. Восьмивитковая обмотка питалась током, возникающим при разряде конденсаторной батареи через трансформатор. Длительность импульса тока около 200 мкс.

Измерение геометрических параметров пучка в синхротроне производилось с помощью дистанционно управляемых пробников в виде тонких пластин. Некоторые из них покрывались порошком сернистого цинка, что давало возможность визуально наблюдать размер и положение пучка с помощью телевизионной установки ПТУ-102. Ток в пучке измерялся индукционным датчиком с чувствительностью 1 мВ/мА. Кроме того, в синхротронном режиме ток измерялся пикап-электродом.

Специальная система синхронизации обеспечивала определенную последовательность включения всех элементов установки. Она же подавала команду на выключение ВЧ в момент, когда энергия электронов достигала заданного значения, а также команды на включение элементов канала, соединяющего Б-4 и ВЭППЗ. На рис. 7 показана форма основных импульсов элементов синхротрона и очередность их следования.

Инжектор обеспечил возможность успешного запуска накопителя ВЭППЗ в электронном режиме. Однако существовавшая в то время система получения позитронов не могла обеспечить возможности эффективного проведения физических экспериментов по физике частиц, поэтому с 1974 года начались интенсивные поиски новых вариантов получения позитронов.

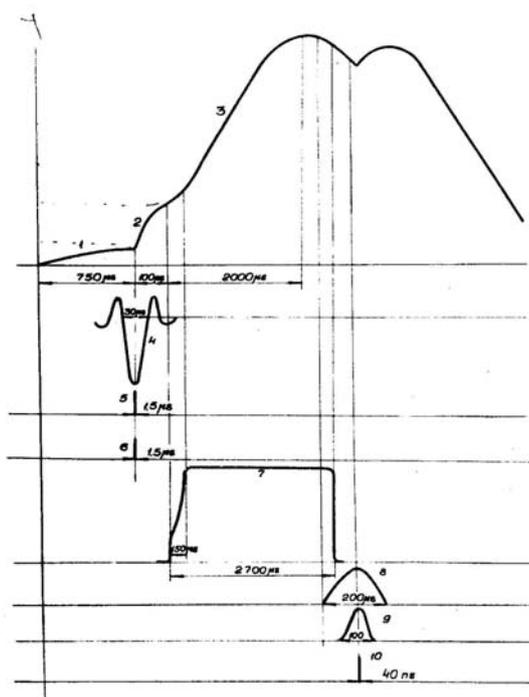


Рис. 7. Основные импульсы элементов синхротрона.

1 – магнитное поле инжекции; 2 – поле во время бетатронного ускорения; 3 – основное магнитное поле; 4 – напряжение на ускорительной трубке ЭЛИТ-3; 5 – импульс тока инжекции; 6 – напряжение на сердечнике накопления; 7 – напряжение на ускоряющем резонаторе; 8 – поле в магните, искажающем медианную плоскость; 9 – магнитное поле выпускного магнита; 10 – напряжение на пластинах дефлектора.

## Основные параметры инжектора "Позитрон" к 1977 году

Энергия инъекции, МэВ	2
Длительность импульса инъекции, мкс	1.5
Амплитуда тока инъекции, А	3
Максимальная энергия электронов, МэВ	430
Радиус равновесной орбиты, см	102
Длина прямолинейных промежутков, см	4×40
Вертикальная апертура, см	9
Радиальная апертура, см	14
Показатель спада магнитного поля	0.4
Мощность генератора ВЧ, кВт	500
Частота генератора, МГц	75
Амплитуда напряжения на резонаторе, кВ	60
Время ускорения, мс	2.5
Вакуум в камере синхротрона, Торр	$1 \cdot 10^{-5}$
Амплитуда тока в шинах электромагнита, кА	140
Энергия, запасенная в магнитном поле, кДж	90
Число ускоренных электронов в импульсе,	$2 \cdot 10^{11}$
Частота повторения циклов ускорения, Гц	1

### 3. Выбор нового варианта позитронного инжектора

#### 3.1. Проектный вариант получения позитронов

Проектный вариант получения позитронов – с конверсией после Б4 [16] не мог обеспечить нужное количество позитронов. Позитроны получались после конверсии выпущенного из синхротрона электронного пучка на тяжелой мишени. В этом варианте инъекция в накопитель ВЭППЗ является однооборотной. Впускаемый пучок вводился в камеру снизу параллельно медианной плоскости на краю вертикальной апертуры дорожки, увеличенной в месте инъекции, и через четверть периода бетатронных колебаний подвергался воздействию инфлектора, который гасил амплитуду когерентных колебаний пучка.

Перпендикулярность направления выпуска из инжектора впускаемому промежутку накопителя создавала определенные трудности при инъекции позитронов, поскольку в случае конверсии до  $90^\circ$  поворота дисперсия его приводит к большим амплитудам бетатронных колебаний частиц с неравновесной энергией, конверсия же после поворота в реальной геометрии впускного промежутка ВЭППЗ была затруднена из-за недостатка места.

Поэтому для инъекции позитронов была выбрана трасса, на которой 90-градусный поворот мог быть разбит на два по  $45^\circ$  с квадрупольным триплетом в промежутке, фокусировка которого создавала одну полуволну бетатронных колебаний пучка между центрами магнитов, что обеспечивало вычитание их дисперсий. При этом могла быть решена задача согласования дисперсионных функций пучка и дорожки.

В проектном варианте позитронного канала первый из 45-градусных магнитов (КПМ, рис. 8) совмещал в себе функции поворотного магнита, создающего нужную дисперсию в позитронном пучке, и короткофокусной светосильной линзы, собирающей позитроны с конвертера, что достигалось за счет малого радиуса магнита, равного 7.5 см, обеспечивающего при показателе спада поля  $n = 0.5$  и угле поворота  $45^\circ$  аксиально-симметричную фокусировку частиц с главным фокусным расстоянием  $F = 20$  см, при апертуре  $A_z = A_r = \pm 1$  см, позволяющей собирать позитроны в пределах средне-квадратичного угла выхода их из конвертера.

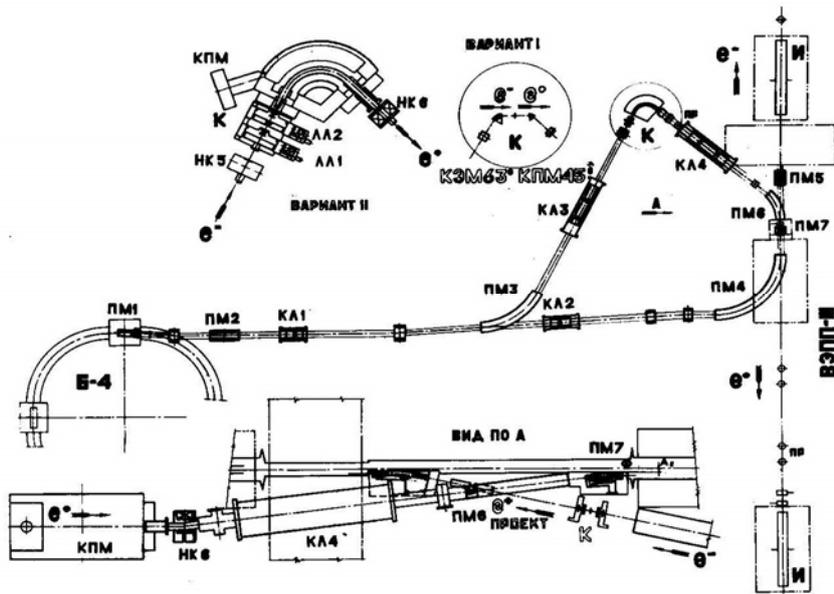


Рис. 8. Схема электрон-позитронного канала накопителя ВЭППЗ. Буквами обозначены: ПМ – поворотные магниты; КЛ – квадрупольные линзы; НК – нацеливающие катушки; пр – пробники; И – инфлекторы; К – блок конверсии; КЭМ – светосильный магнит для фокусировки электронов в проектном варианте блока конверсии (вариант 1); КПМ – магнит для фокусировки и энергетической дисперсии позитронов в проектном и настоящем (вариант 2) вариантах; ЛЛ1 и ЛЛ2 – фокусирующая и собирающая литиевые линзы.

Для фокусировки электронов на конвертер также предполагалось использовать поворотный магнит КЭМ, осуществляющий вместе с магнитом ПМ-3 параллельный перенос электронного пучка к месту конверсии. При угле поворота  $63^\circ$ , радиусе 12.5 см и показателе спада поля  $n = 0.5$  фокусное расстояние КЭМ составляло 25 см по обоим направлениям. Апертура магнита  $A_z = A_r = \pm 8$  мм. При указанных радиусах и энергиях электронов  $E^- = 430$  МэВ и позитронов  $E^+ = 250$  МэВ поля в магнитах составляют  $B \approx 110$  кГс.

Трудности эксплуатации в течение миллионов импульсов магнитов с полями  $\approx 110$  кГс – конверсионных магнитов КЭМ и КПМ в их нормальном режиме, на той стадии их разработки, которая соответствовала началу запуска накопителя ВЭППЗ, заставили отказаться от использования таких магнитов в блоке электрон-позитронной конверсии ВЭППЗ и перейти к полям  $\approx 50$  кГс. При этом пара поворотных магнитов блока конверсии была заменена одним с углом поворота  $108^\circ$ , радиусом 17.2 см, соответствующим полю 50 кГс при проектной энергии позитронов, и апертурой  $22 \times 24$  мм<sup>2</sup>. Увеличение угла поворота магнита позволило сохранить фокусное расстояние его равным  $\approx 25$  см, и использовать магнит для собирания позитронов с конвертера на первом этапе работы позитронного канала.

Задача фокусировки электронов в блоке электрон-позитронной конверсии в минимальный размер была решена с помощью литиевой линзы [17] с фокусным расстоянием  $\approx 5$  см при энергии электронов 430 МэВ.

Линза, применяемая для этой цели, представляла собой цилиндр из лития длиной 17 мм и диаметром 6 мм, ограниченный на торцах дисками из бериллия толщиной по 1 мм, служащими как для механического удержания лития в заданном объеме, так и для аксиально симметричного подвода тока, пропускаемого по линзе вдоль ее оси.

Фокусное расстояние 5 см при энергии электронов 430 МэВ достигалось при поле, равном 54 кГс на поверхности линзы. Ограничением на величину поля служило

давление на токоподводящие диски, толщина которых в свою очередь была ограничена рассеянием частиц, составляющим заметную часть рассеяния по всей линзе. Среднеквадратичный угол многократного рассеяния электронов с энергией 430 МэВ в линзе и подводящих дисках составлял  $\sim 4.5 \cdot 10^{-3}$  рад.

С этой системой конверсии была получена скорость накопления позитронов в ВЭППЗ  $\sim 45$  мкА/мин. ( $1.2 \cdot 10^6$   $e^+$ /имп.), что давало возможность накапливать ток позитронов в ВЭППЗ не более 5-6 мА – слишком мало для проведения полномасштабных экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками в ВЭППЗ.

### 3.2. Рассматриваемые варианты получения позитронов

В декабре 1974 г. была проведена серия обсуждений, на которых рассматривались возможные варианты повышения эффективности позитронного инжектора. Среди них рассматривались, в разной степени проработанности, в частности:

- 1) Двойной проход в ЛУ – а) с обходом снаружи или б) с разворотом пучка после первого ускорения.
- 2) Удлинение ЛУ (в сторону энергоцентра, под промежутком ВЭППЗ).
- 3) Удлинение импульса главного поля в Б4, обеспечивающее затухание пучка, уменьшение его размеров перед выпуском, улучшение выпуска, улучшение захвата в ВЭППЗ.
- 4) Использование НАПа в качестве бустера.
- 5) Создание линейного ускорителя на 1 ГэВ. От этого варианта вынуждены были отказаться в силу ряда экономических причин.
- 6) Серьезно обсуждалась возможность строительства канала ВЭПП2 – ВЭППЗ (Г.И. Сильвестров и др.).

Достоинства этого варианта:

- можно было относительно быстро обеспечить ВЭППЗ реальными позитронами, т.к. позитроны в ВЭПП2 уже существовали;
- пучок позитронов радиационно затух;
- в этом случае в институте будет единый источник позитронов;
- минимальное время остановки ВЭППЗ для переделок;
- для осуществления этого варианта отвлекается минимум людей с ВЭППЗ.

Недостатки:

- большие строительные работы по строительству длинного канала;
- в дальнейшем завязываются по работе ВЭПП2 и ВЭППЗ

В случае реализации этого проекта ожидаемое число позитронов должно было составить  $0.83 \cdot 10^7$   $e^+$  / импульс.

- 7) Одним из вариантов было предложение построить бетатрон в зале ВЭППЗ с последующим ускорением позитронов в Б-4 (В.Н.Пакин).

Инжекция – из ЭЛИТ-3 ( $E = 2.5$  МэВ,  $I_{инж} = 5$  А).

Основные параметры бетатрона:

- $R_0 = 32$  см, 4 промежутка по 16 см,  $R_{сред} = 45$  см;
- Апертура  $8 \times 10$  см<sup>2</sup>;
- $E_{max} = 60$  МэВ;
- $N_{ускор} = 4 \cdot 10^{11}$   $e^-$ /имп.;
- Конверсия –  $60^-/15^+$  МэВ;
- Коэффициент конверсии  $5 \cdot 10^{-3}$  при  $\Delta E^+/E^+ = \pm 3\%$ .

Возможные потери:

- Коэффициент выпуска из бетатрона ~ 0.7
- Коэффициент бетатронного захвата в Б4 ~ 0.6
- Коэффициент синхротронного захвата в Б4 ~ 0.3
- Коэффициент выпуска из Б4 ~ 0.5
- Коэффициент прохождения канала Б4 – ВЭППЗ ~ 1
- Коэффициент захвата в ВЭППЗ ~ 0.3
- Итого:  $0.7 \times 0.6 \times 0.3 \times 0.5 \times 1 \times 0.3 \sim 0.02$

Ожидаемое число позитронов в ВЭППЗ (с учетом потерь):  $\Rightarrow 4 \cdot 10^{11} \times 5 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^7 e^+/\text{имп.} \approx 25 \text{ мкА}/\text{имп.}$  (в единицах тока ВЭППЗ)

Достоинства предлагаемого варианта:

- относительно короткий канал;
- возможность монтажа, настройки и получения позитронов в отдельном месте (но с другим ЭЛИТом);
- очень скоро можно будет реально сказать, какой ток будет ускорен (ещё на этапе инжекции);
- в то время были почти свободные квалифицированные специалисты, делавшие бетатроны – Глаголев, Мешков.

Недостатки:

- на время сборки и настройки бетатрона на месте будет стоять ВЭППЗ (3-6 месяцев);
- требуется переделка Б4 для ускорения позитронов

**8)** К тому времени был серьезно проработан вариант с промежуточным бустерным накопителем "Напёнок" (Е.А. Переведенцев).

Были проработаны два варианта:

**8.1)** Вариант 1973 г. – с расположением "Напёнка" в зале ВЭППЗ [18].

Первоначальный вариант получения позитронов в ВЭППЗ с использованием бустерного накопителя после Б4 предполагал его размещение в зале ВЭППЗ. Схема показана на рис. 9. Электроны, ускоренные в Б-4 до предельной энергии и выпущенные в существующий канал, отводятся от своего обычного пути и фокусируются на конвертер.

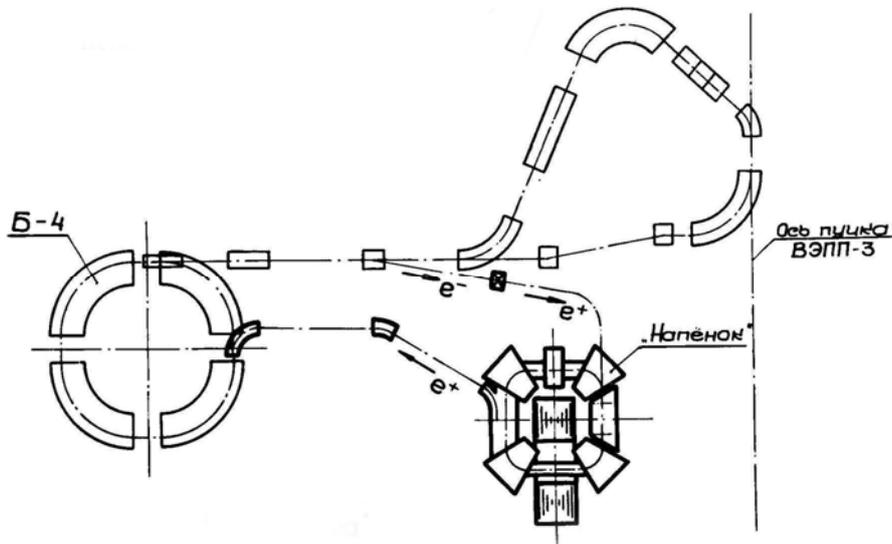


Рис. 9. Схема получения позитронов с использованием "Напёнка", расположенного в зале ВЭППЗ.

Позитроны с энергией 20–30 МэВ в энергетическом интервале  $\pm 10\%$  собираются короткофокусной линзой и вводятся (с корреляцией энергия–орбита) в специальную магнитную дорожку – "Напёнок". После радиационного охлаждения (с использованием повышения энергии в дорожке) позитроны выпускаются из "Напёнка" и вводятся в Б-4 с измененным знаком магнитного поля. В синхротроне они ускоряются до максимальной энергии и выпускаются по обычному тракту.

Эта схема получения позитронов ценой усложнения комплекса ВЭППЗ дает возможность:

- Поднять расчетный коэффициент конверсии до нескольких процентов.
- Инжектировать в ВЭППЗ хорошо охлажденный пучок позитронов (что позволяет без потерь работать с неполностью используемой камерой ВЭППЗ).
- Инжектировать позитроны в ВЭППЗ на максимальной энергии синхротрона (легче накапливать большие токи, больше время жизни).

Предполагалось, что изготовление системы, в основном, может быть закончено в 1973 году.

### 8.2) Вариант 1974 г. – с расположением "Напёнка" в зале РИУС [19].

В процессе работы над проектом "Напёнка" был предложен новый вариант, позволявший, ценой усложнения конструкции бустерного накопителя и системы транспортировки, отказаться от ускорения позитронов в Б-4 и существенно повысить количество позитронов в ВЭППЗ (рис. 10). В этом варианте электроны, ускоренные в Б-4 до максимальной энергии 430 МэВ, выпускаются в существующий канал, затем через канал Б4-ВЭППЗ и  $\Sigma$ -канал отводятся в зал РИУС и фокусируются на конвертер.

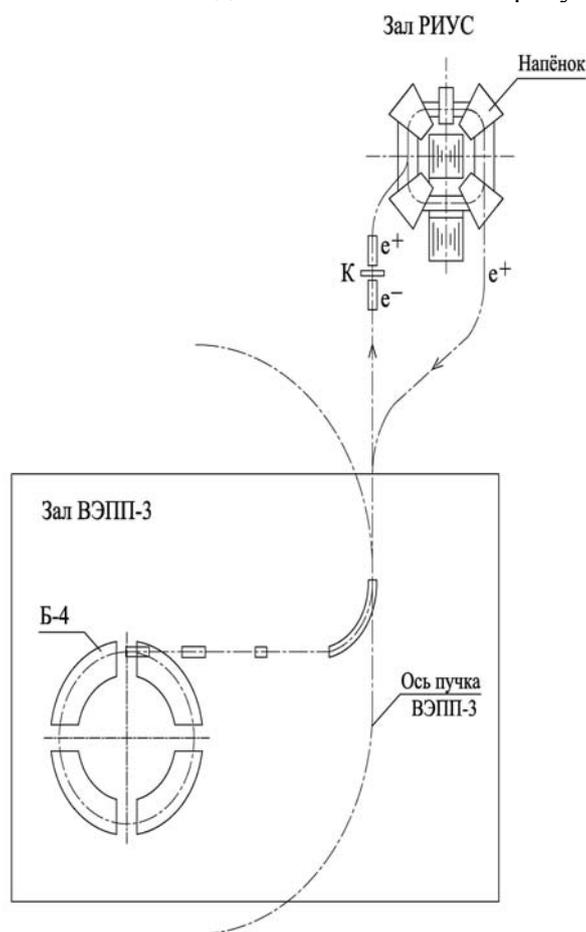


Рис. 10. Схема расположения "Напёнка" в варианте 1974 года.

Позитроны с энергией 50 МэВ в энергетическом интервале 10% собираются короткофокусной светосильной X-линзой и вводятся (с нужным согласованием и корреляцией энергия-орбита) в промежуточный позитронный накопитель "Напёнок". После инъекции позитронов энергия поддерживается на постоянном уровне 50 МэВ в течение 1 сек, радиационные потери компенсируются бетатронным сердечником. За это время энергетический разброс в пучке затухает до  $\pm 1.5\%$ . Затем включается ВЧ-напряжение, происходит адиабатический захват пучка в синхротронный режим и энергия поднимается до 350 МэВ; одновременно рабочая точка сдвигается на резонанс связи  $v_z = v_r$  для получения быстрого затухания радиальных бетатронных колебаний. За время ускорения (0.5 сек) амплитуда бетатронных колебаний затухает до 1 – 2 мм, а энергетический разброс в пучке – до величины 0.1%. Выпущенный при максимальной энергии позитронный пучок инжектируется в ВЭППЗ через существующий  $\Sigma$ -канал.

Для получения позитронного тока в ВЭПП4 предполагалось вести накопление ускоренных в "Напёнке" позитронов в существующий накопитель НАП-М при энергии 350 МэВ с последующим ускорением накопленного тока до 1 ГэВ и инъекцией непосредственно в ВЭПП4.

#### Основные параметры промежуточного позитронного накопителя "Напёнок"

Радиус поворота в магнитах, см	73
Длина прямолинейных промежутков, см	151
Вертикальная апертура, мм	38
Радиальная апертура, мм	200
Адмиттанс при полной вертикальной апертуре, см·мрад	$22\pi$
Принимаемый энергетический разброс, %	10
Энергия инъекции, МэВ	50
Максимальная энергия, МэВ	350
Общий вес магнитной системы, т	20
Частота повторения циклов ускорения, Гц	0.5

#### Расчетные характеристики позитронного пучка

Оптимальная толщина конвертера, рад.дл.	2
Относительный выход позитронов при энергии 50 МэВ	0.3
Среднеквадратичный поперечный фазовый объем, см·мрад	$4.4\pi$
Среднеквадратичный угол расходимости, °	14
Среднеквадратичный диаметр пучка на выходе конвертера, мм	1
Коэффициент конверсии, %	2

Схема получения позитронов с промежуточным позитронным накопителем за счет наращивания ускорительного комплекса давала возможность увеличить расчетную эффективность конверсии до 2%.

Выигрыш по сравнению с предельными возможностями существовавшей на ВЭППЗ системы конверсии складывался, в основном, из следующих факторов:

- увеличение спектральной плотности позитронов при энергии инъекции 50 МэВ (по сравнению с 220 МэВ) – 5 раз;
- увеличение принимаемого в накопитель энергетического разброса – 5 раз;
- увеличение коэффициента захвата в поперечный фазовый объем накопителя – 4 раза.

Реализация расчетного коэффициента конверсии 2% при достигнутом токе выпущенного из Б-4  $I_{\text{вып}} = 1$  А позволяла иметь ток позитронов за импульс 20 мА в единицах тока Б-4 или 0.5 мА в единицах тока ВЭПП4. Это означает, что за час работы можно накопить около 0.5 А позитронов в ВЭПП4.

Помимо этого, в такой системе в накопитель (ВЭППЗ, НАП-М, ВЭПП4) мог инжектироваться хорошо охлажденный позитронный пучок, что давало возможность без потерь вести инжекцию с предупредом накопленного сгустка (при этом может использоваться неполная апертура) для укладки позитронного сгустка в одну сепаратрису высокой гармоники ВЧ напряжения.

К середине 1974 г. были проведены магнитные измерения на модели квадранта 1:3. Разработана принципиальная схема системы стабилизированного силового питания, испытаны на макетах её основные узлы. Проведена эскизная проработка общего вида накопителя. Проектирование систем накопителя могло быть закончено в течение 1974 года. Проектные параметры могли быть получены к концу 1975 года.

К сожалению, конструирование основных узлов "Напенка" было приостановлено в стадии, близкой к окончанию, в связи с рассмотрением другого варианта позитронной программы (на основе гирокона и ЛУ, см. ниже).

- 9) К лету 1974 г. в ИЯФ была опробована модель предложенного Г.И. Будкером в 1967 г. гирокона – мощного СВЧ генератора с несгруппированным релятивистским пучком, который может использоваться для раскачки сильноточного линейного ускорителя с большой накопленной энергией [20, 21]. На этой основе был предложен новый вариант позитронного источника для ВЭППЗ [19].

Для расчета конверсии электронов в позитроны при относительно низкой (20 – 70 МэВ) энергии группой теоретиков под руководством Б.В. Чирикова был выполнен цикл работ [22, 23, 24, 25, 26]. Результаты расчетов представлены на рис. 11–18.

Согласно этому проекту электроны, ускоренные в линейном ускорителе до энергии 20 ÷ 70 МэВ при токе пучка 25 ÷ 80 А в среднем за импульс длительностью 30 нс при частоте повторения 1 Гц, фокусируются на конвертере в пятно диаметром около 1 мм. При оптимальной толщине конвертера относительный выход позитронов может составить  $(0.6 \div 4) \cdot 10^{-2}$  по расчетным оценкам, приведенным в работе Б.В. Чирикова и В.А. Таюрского. Позитроны вводятся в синхротрон Б-4, откуда, после ускорения до 350 МэВ, инжектируются в ВЭППЗ и далее в ВЭПП4.

Электроны с указанными выше параметрами предполагалось получать с помощью линейного ускорителя, составленного из двух секций по шесть связанных резонаторов в каждой.

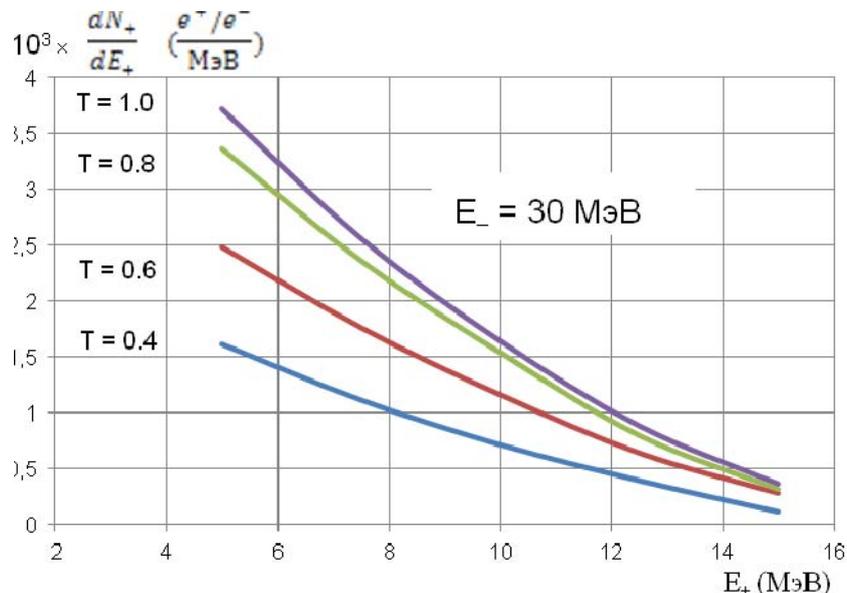


Рис. 11. Энергетические спектры позитронов, выходящих из мишени вперед в  $\Omega = 2\pi$ .

$E = 30 \text{ МэВ}$ .

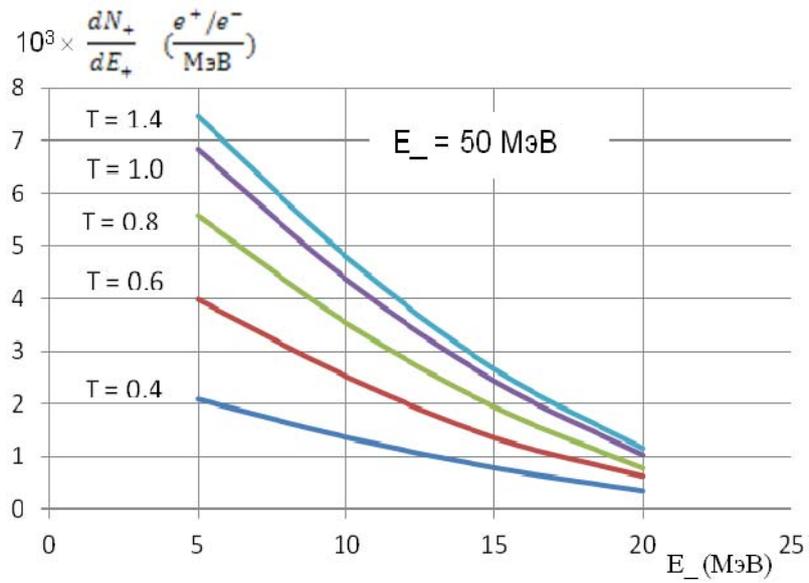


Рис. 12. Энергетические спектры позитронов, выходящих из мишени вперед в  $\Omega = 2\pi$ .  $E = 50 \text{ МэВ}$ .

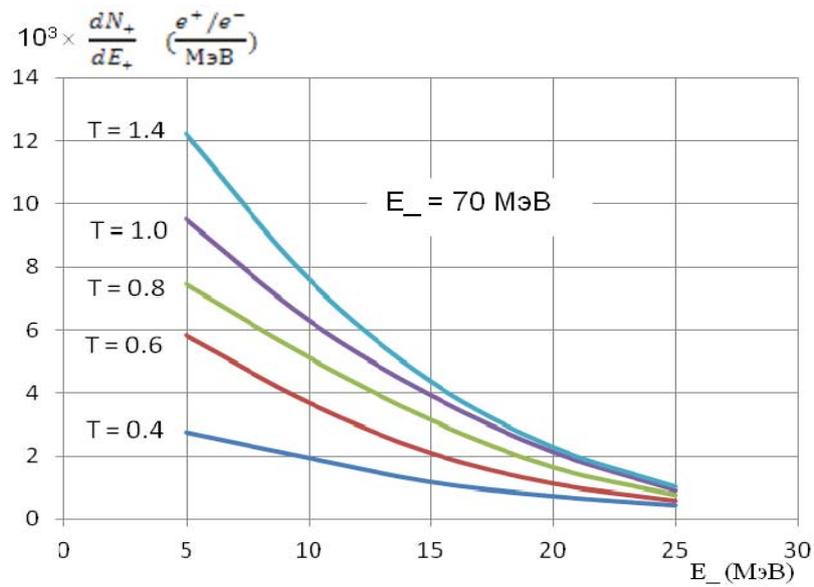


Рис. 13. Энергетические спектры позитронов, выходящих из мишени вперед в  $\Omega = 2\pi$ .  $E = 70 \text{ МэВ}$ .

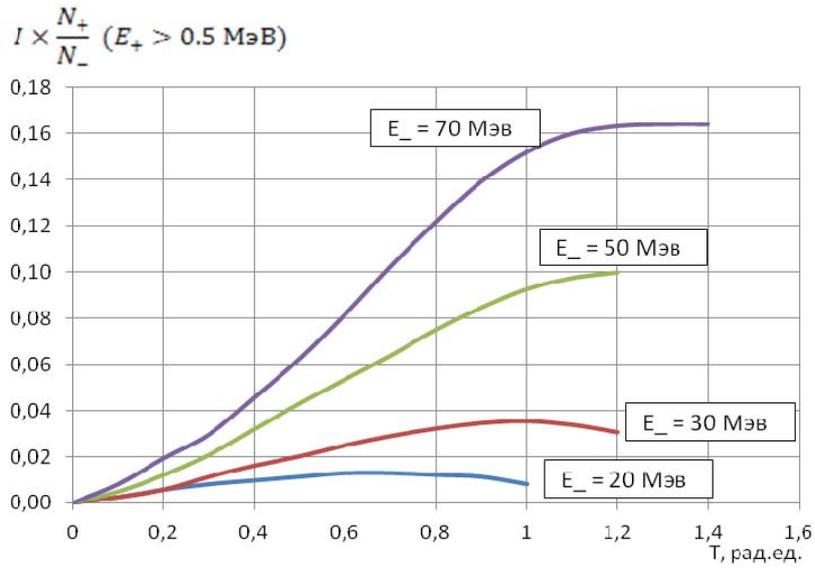


Рис. 14. Полный выход позитронов всех энергий вперед в  $\Omega = 2\pi$  в зависимости от толщины мишени  $T$ .  $E_- = 20 - 70$  МэВ.

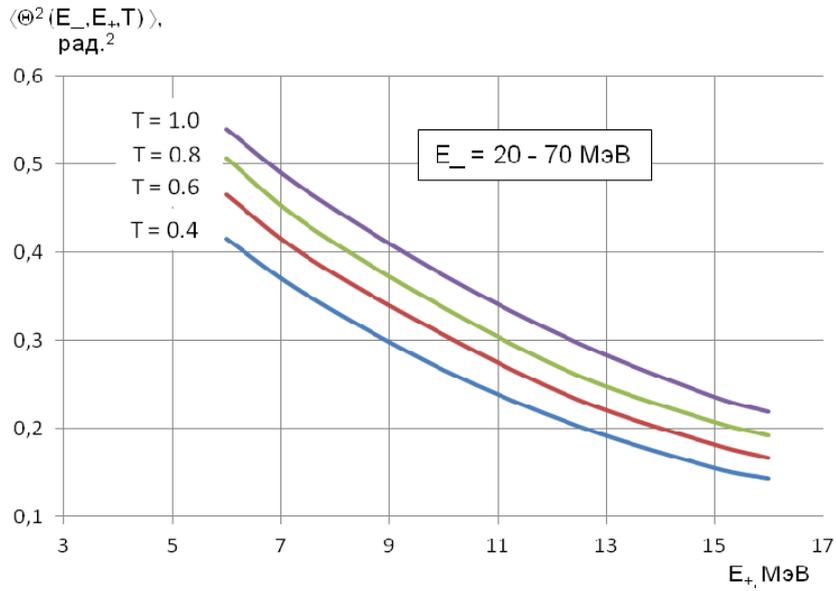


Рис. 15. Средний квадрат пространственного угла позитронов, выходящих из мишени, в зависимости от  $E_+$  для различных  $T$ .  $E_- = 20 - 70$  МэВ.

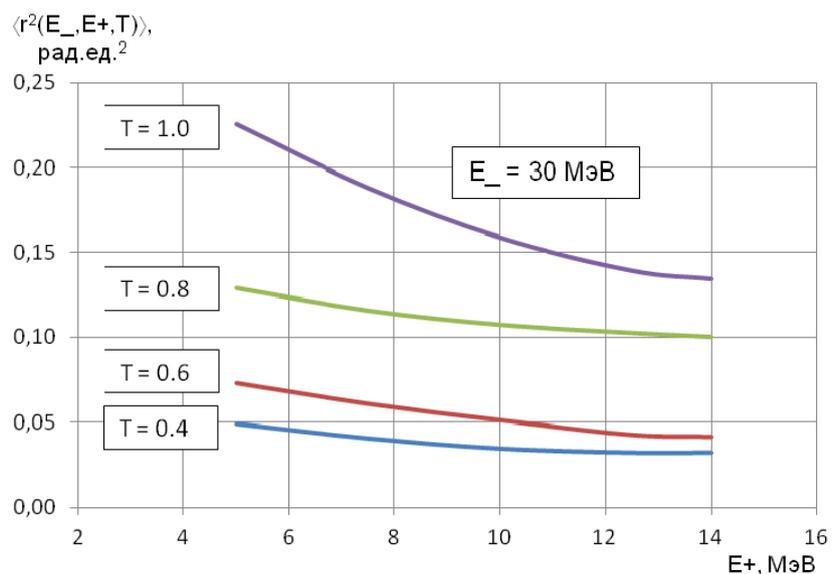


Рис. 16. Средний квадрат радиуса позитронного пучка в зависимости от  $E_+$  для  $T = 0.4 - 1.0$  рад.ед.  $E_- = 30$  МэВ.

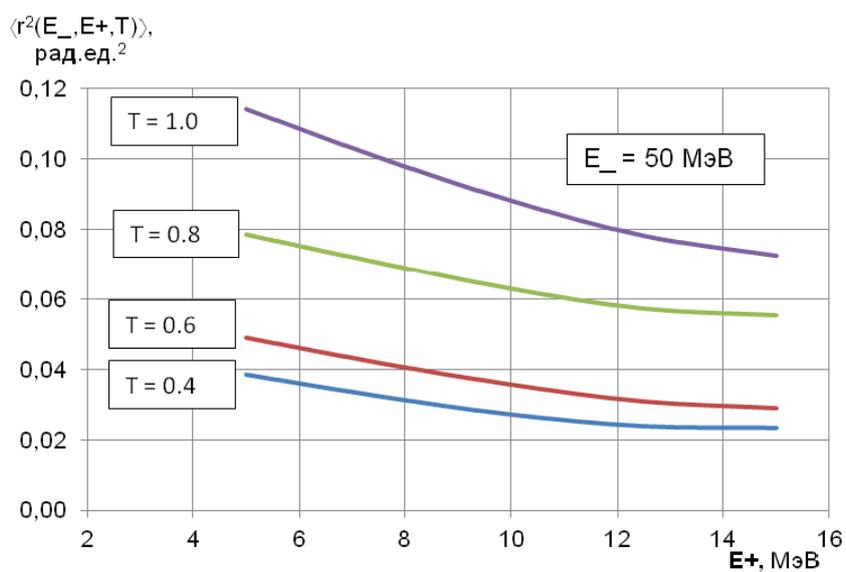


Рис. 17. Средний квадрат радиуса позитронного пучка в зависимости от  $E_+$  для  $T = 0.4 - 1.0$  рад.ед.  $E_- = 50$  МэВ.

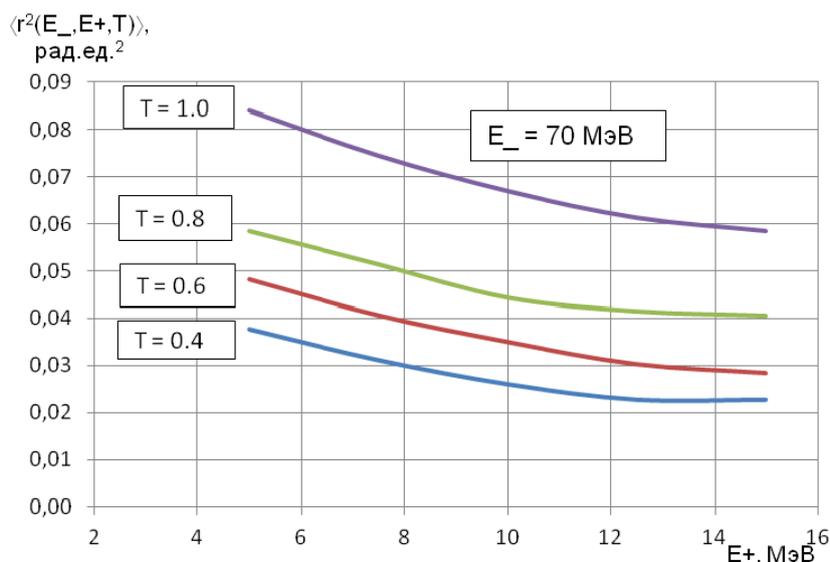


Рис. 18. Средний квадрат радиуса позитронного пучка в зависимости от  $E_+$  для  $T = 0.4 - 1.0$  рад.ед.  $E_- = 70$  МэВ.

В качестве источника ВЧ питания линейного ускорителя предполагалось применить импульсный гирокон на 430 МГц, разработанный в институте, а для возбуждения резонатора гирокона – усовершенствованный ускоритель ЭЛИТ-2, на котором предполагалось получить электронный пучок с энергией  $1.5 \div 1.8$  МэВ и током  $20 \div 90$  А в импульсе длительностью  $6 \div 10$  мкс, пригодный для возбуждения гирокона.

В зависимости от параметров пучка, возбуждающего резонатор гирокона, можно было рассчитывать на получение величин позитронного тока, указанных в таблице 3.1.

При расчетах, которые являлись предварительными, предполагалось, что толщина конвертера выбрана так, чтобы позитроны с угловым разбросом по радиусу захватывались в Б-4 полностью, при этом заметного расширения пятна на выходе из конвертера не происходит, а захват позитронов в Б-4 по вертикали составит 25%.

**Таблица 3.1. Основные параметры предлагаемого источника позитронов**

Импульсная мощность пучка, возбуждающего резонатор гирокона	МВт	30	50	150
Длительность импульса возбуждающего тока	мкс	6	6	10
Энергия электронов на выходе линейного ускорителя	МэВ	20	30	70
Ток линейного ускорителя в среднем за импульс	А	25	35	80
Относительный выход позитронов		$0.6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Расчетный позитронный ток в Б4 в среднем за импульс (без учёта потерь при транспортировке и захвате)	мА	1	7	20

На момент обсуждения вариантов позитронной программы (лето 1974 г.) велись расчеты и проектирование резонаторов линейного ускорителя, рассматривались варианты системы транспортировки пучка, инжекционной и конверсионной систем; велось проектирование новой электронно-оптической системы гирокона, которая должна обеспечить улучшение токопрохождения с 60% до 90% и повышение коэффициента усиления гирокона с 6 до 24 дБ; велась подготовка гирокона и

задающего ВЧ генератора к монтажу и наладке в экспериментальном блоке 1-го корпуса; вёлся монтаж ЭЛИТ-2 в экспериментальном блоке 1-го корпуса, а также проектирование новой схемы питания ЭЛИТ, обеспечивающей удлинение импульса тока до 6 мкс.

В качестве первого этапа предполагалось осуществить запуск ЭЛИТ-2 с гироконом и линейным ускорителем и получить параметры, соответствующие первому столбцу таблицы 3.1. Ориентировочный срок готовности 1-го этапа – 1975 г., испытания на Б-4 – 1976 г.

По расчётам, последующие этапы этого варианта, включающие в себя разработку импульсного источника питания на  $1.5 \div 2$  МВ, рассчитанного на длительность импульса  $10 \div 20$  мкс, усовершенствование гирокона с целью получения  $200 \div 400$  МВт ВЧ мощности в импульсе, а также удвоение числа секций сильноточного линейного ускорителя, возможно, могли позволить существенно увеличить позитронный ток по сравнению с величиной, указанной в третьем столбце таблицы 3.1.

В качестве дальнейшего развития этого источника рассматривались возможности организации двойного прохода электронов через ЛУ – с обходом вне ЛУ или с разворотом пучка на выходе и ускорением в обратном направлении и др.

*В итоге всех обсуждений было принято несколько субъективное решение остановиться на варианте с Гироконом, который в то время казался более перспективным, несмотря на гораздо меньшую проработанность по сравнению с "Напёнком".*

#### **4. Современное состояние инжектора "Позитрон"**

Как уже говорилось, в работающем ныне на комплексе ВЭПП4 позитронном инжекторе позитроны получают путем конверсии электронов, ускоренных в сильноточном линейном ускорителе (ЛУ) до энергии 50 МэВ, с последующим ускорением позитронов в синхротроне до энергии 350 МэВ и в накопителе ВЭПП3, работающем в бустерном режиме – до 1.8 ГэВ. Создание ЛУ с большой накопленной энергией оказалось возможным в связи с разработкой в Институте ядерной физики гирокона – мощного СВЧ-генератора с несгруппированным релятивистским пучком, который был предложен Г.И. Будкером в 1967 году [27].

Блок-схема всей установки, включая синхротрон Б4, линейный ускоритель (ЛУ), импульсный гирокоп, ускоритель ЭЛИТ-3А и все остальные элементы, необходимые для получения и транспортировки пучков, приведена на рис. 19 и 20а, общий вид установки – на рис. 20б.

Электроны с энергией до 100 кэВ в течение 27 нс (1 оборот в синхротроне) инжектируются пушкой (4) и ускоряются в двух секциях ЛУ (3А, 3В) до энергии 50 МэВ. В блоке конверсии (5) электроны фокусируются на вольфрамовый конвертер толщиной 3.5 мм (1 радиационная единица), а полученные позитроны при энергии 7 МэВ (максимум спектра) направляются через систему транспортировки (6) в синхротрон Б-4 (8), где ускоряются до энергии 350 МэВ в синхротронном режиме. Для улучшения синхротронного захвата применено доускорение частиц после инжекции до энергии 13 МэВ с помощью бетатронного сердечника (9). При энергии 350 МэВ частицы через электронно-оптический канал (10) переводятся в накопитель ВЭПП3, который является бустером накопителя ВЭПП4. Возбуждение ЛУ производится от импульсного гирокона (2), преобразующего энергию электронного пучка ускорителя ЭЛИТ-3А (1) в энергию электромагнитных колебаний. Получение электронов с энергией 7 МэВ для последующего ускорения в синхротроне производится смещением времени запуска электронной пушки на передний или задний фронт ускоряющего напряжения ЛУ. Конвертер при этом выводится из области прохождения пучка, а в

системах транспортировки и синхротрона изменяется направление управляющих и ускоряющих полей.

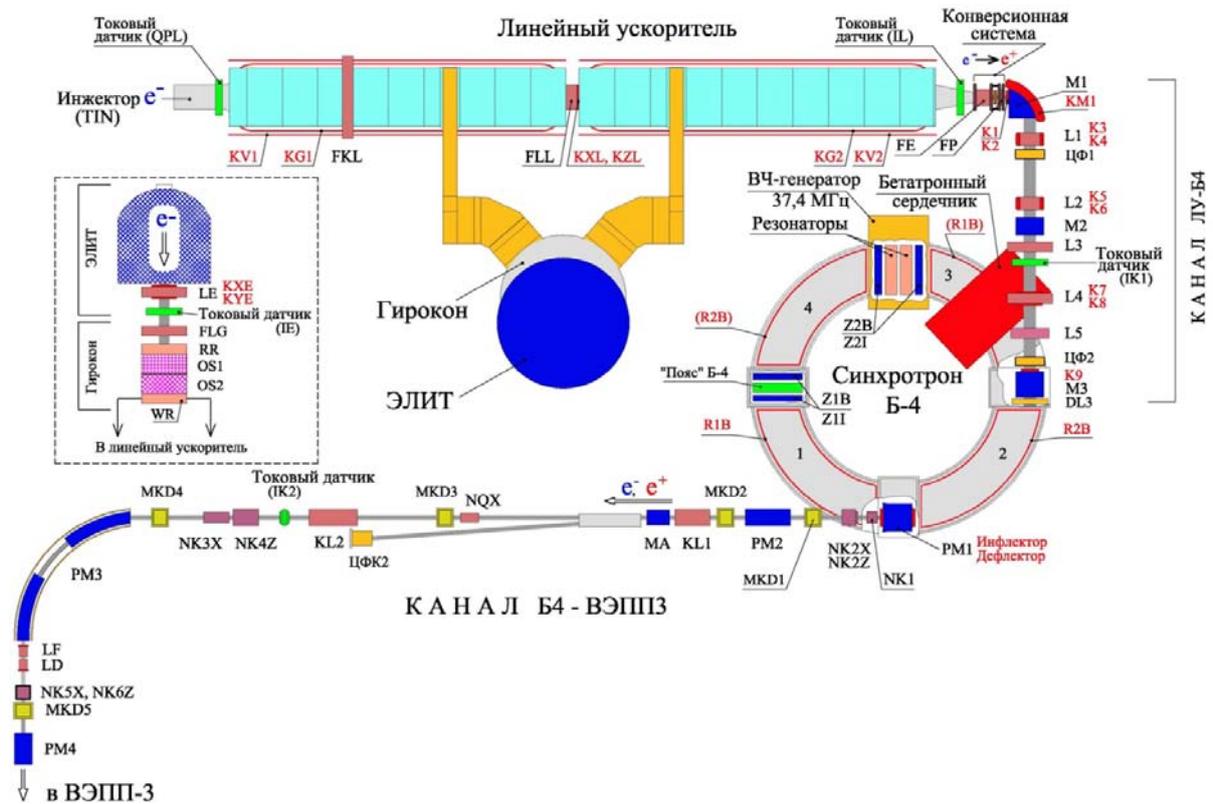
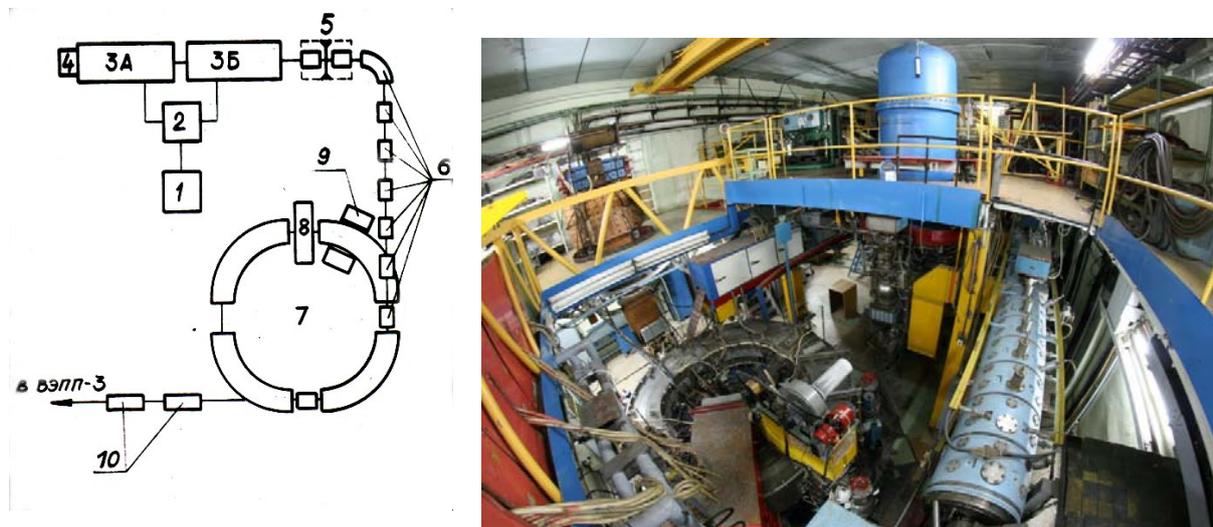


Рис. 19. Схема инжектора "Позитрон" и канала Б4 – ВЭПП3.



а) б)

Рис. 20. Блок-схема (а) и общий вид (б) позитронного источника.

1 – источник релятивистских электронов ЭЛИТ-3А; 2 – гирокон; 3А и 3Б – секции ЛУ; 4 – электронная пушка; 5 – конверсионная система; 6 – система транспортировки частиц ЛУ – Б4; 7 – синхротрон Б4; 8 – ускоряющий ВЧ резонатор; 9 – бетатронный сердечник; 10 – элементы системы электронно-оптического канала Б4 – ВЭПП3.

Основные импульсы позитронного источника, характеризующие его работу, приведены на рис. 21. [28].

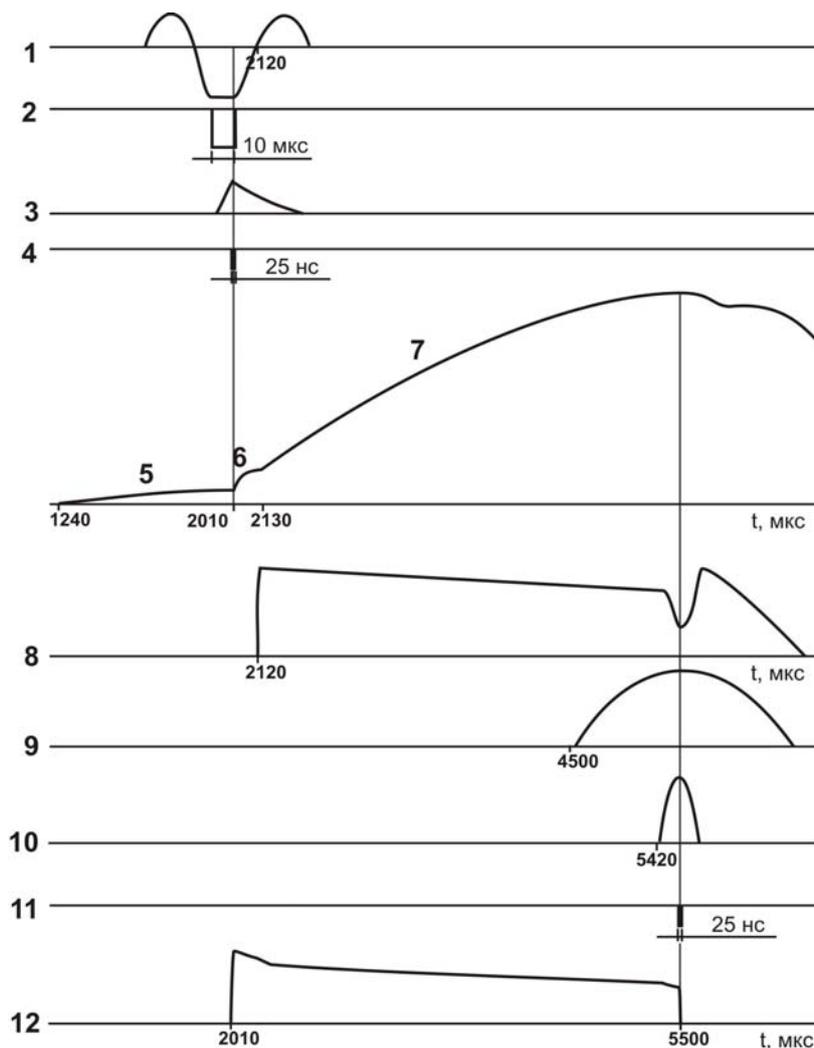


Рис. 21. Основные импульсы позитронного источника.

1 – ускоряющее напряжение ЭЛИТ-3А; 2 – ток пучка ЭЛИТ-3А; 3 – ускоряющее напряжение ЛУ; 4 – ток пучка ЛУ; 5 – магнитное поле инжекции; 6 – магнитное поле бетатронного ускорения; 7 – магнитное поле синхротронного ускорения; 8 – ВЧ напряжение резонатора Б4; 9 – магнитное поле радиальной коррекции перед выпуском; 10 – магнитное поле вертикальной коррекции перед выпуском; 11 – ток выпущенного пучка; 12 – ток пучка на мониторе в процессе ускорения.

#### 4.1. ЭЛИТ

В высоковольтном ускорителе ЭЛИТ-3А [28, 29, 30, 31, 33] в качестве генератора высокого напряжения используется трансформатор Тесла. Ускоритель формирует электронный пучок с энергией 1.6 МэВ, амплитудой тока до 50 А и длительностью импульса тока 11.5 мкс. Выбор параметров контура трансформатора Тесла производился по его характеристикам в режиме нагрузки прямоугольным импульсом тока. Параметры контуров: коэффициент связи 0.6; собственные частоты 12 кГц. Принципиальная электрическая схема ускорителя приведена на рис. 22а.

Поскольку обеспечение жестких требований к монохроматичности пучка вместе с другими его параметрами в таком режиме привело бы к большим величинам емкостей контуров и, соответственно, большим габаритам установки, большой величине периода колебаний напряжения в контурах и низким энергетическим характеристикам, был принят режим с десятипроцентным изменением напряжения высоковольтного контура

в период протекания импульса тока нагрузки, а требуемая монохроматичность пучка обеспечивалась специальной системой коррекции. Корректирующее напряжение, доускоряющее частицы в начале и в конце импульса тока, а в середине импульса тормозящее их, обеспечивая тем самым постоянство общего напряжения на трубке во время ускорения электронов, создается колебательным контуром  $L2_k, C2_k$ , подключенным к нижним двум секциям ускорительной трубки ("Элитёнок") (рис. 22).

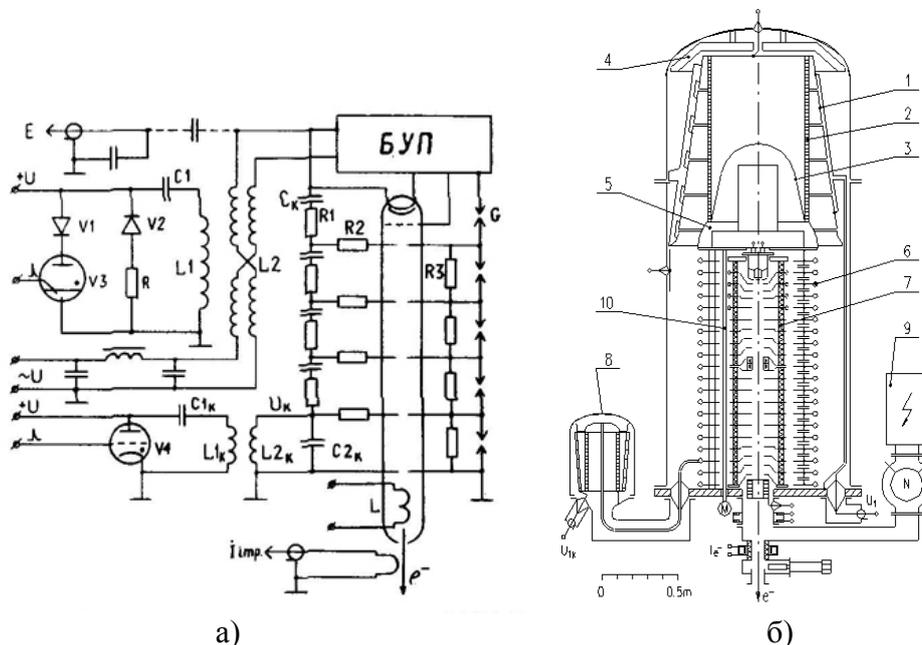


Рис. 22. Принципиальная электрическая схема (а) и схема конструкции (б) ЭЛИТ-3А.  $L$  – фокусирующая электромагнитная линза;  $R3$  – сопротивления для стекания заряда с электродов; 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – защитный электрод; 4 – магнитопровод; 5 – магнитопровод; 6 – высоковольтный емкостной накопитель; 7 – ускорительная трубка; 8 – "Элитёнок"; 9 – магниторазрядный насос; 10 – изоляционные штики для управления параметрами пушечного узла.

Схема конструкции ускорителя представлена на рис. 22б. Обмотки трансформатора Тесла (1) и (2) размещены над коаксиально расположенными ускорительной трубкой (7) и высоковольтной колонной (6). Защитный электрод (3), прозрачный для переменного магнитного потока, практически полностью устраняет перенапряжения между витками вторичной обмотки при пробоях в системе по полному напряжению. Для сокращения габаритов ускорителя установлены магнитопроводы (4) и (5). Котел ускорителя заполнен сжатым газом  $SF_6$  при давлении до 10 ати.

Ускорительная трубка [32] состоит из четырех модулей. До 2003 года между модулями в эквипотенциальных областях были расположены три фокусирующие линзы, собранные из постоянных магнитов. Четвертая линза, электромагнитная, стоит на выходе из трубки и служит для согласования пучка с входом гирокон.

Каждый модуль трубки (рис. 23, 24) собран из стеклянных изоляторов высотой 30 мм и наружным диаметром 320 мм, между которыми расположены электроды, выполненные из нержавеющей стали. Материал колец – стекло марки ЛК-5. Поверхность стекла с вакуумной стороны – ребристая. Между изоляторами и электродами проложены уплотнения из вакуумной резины; попадание паров резины внутрь трубки предотвращается индиевыми прокладками с вакуумной стороны. Каждый модуль стянут снаружи изоляционными стержнями из оргстекла.

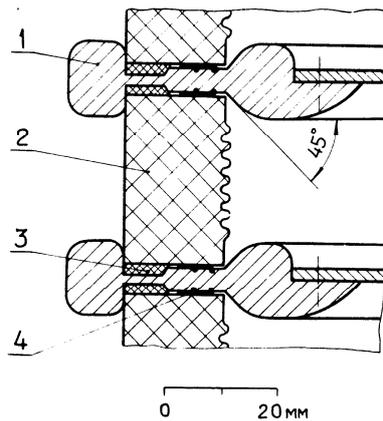


Рис. 23. Элемент ускорительной трубки.

1 – электрод; 2 – изолятор; 3 – резиновый уплотнитель; 4 – индий.

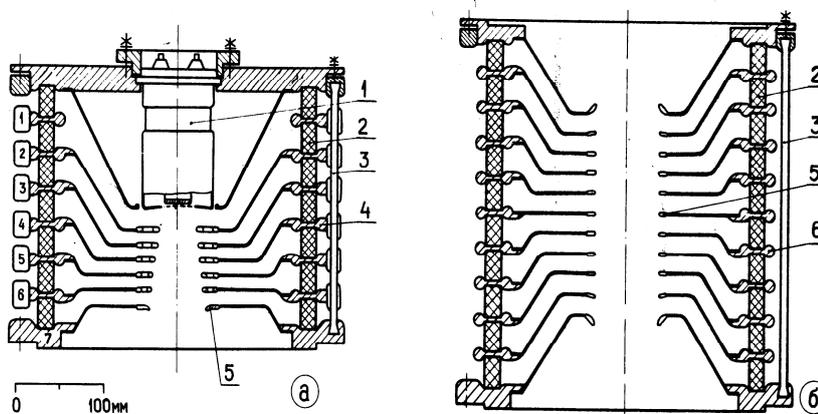


Рис. 24. Конструкция модулей ускорительной трубки.

а – верхний модуль; б – один из трех остальных. 1 – электронная пушка; 2 – изоляционная стяжка; 3 – электрод с радиатором; 4 – электрод с радиатором; 5 – молибденовый электрод; 6 – электрод без радиатора.

Высоковольтная колонна состоит из 37 секций (по числу секций ускорительной трубки). В секции – 18 конденсаторов, образующих 2 группы, соединенные параллельно-последовательно. Как известно, основной причиной пробоя твердых диэлектриков с большой диэлектрической постоянной при переменных и импульсных напряжениях являются частичные разряды в зазорах конструкции и порах материала. Поэтому конденсаторы для колонны были отобраны по результатам их испытаний на уровень частичных разрядов. Контрольные испытания нескольких групп конденсаторов полностью подтвердили связь их срока службы с уровнем частичных разрядов.

Индуктивности корректирующего контура – L1к и L2к помещены в бачок (8, рис. 22), также заполненный SF<sub>6</sub> с небольшим избыточным давлением.

Вакуум в трубке создается магниторазрядным насосом (9) со скоростью откачки 250 л/с.

Электронно-оптическая схема трубки, стоявшей до 2003 года, приведена на рис. 25. Ускоряющее напряжение  $U_{\text{уск}}$ , создаваемое высоковольтным генератором, приложено ко всей трубке, кроме последних двух секций, на которые подается импульс коррекции. Ускорение электронов происходит на четырех участках тракта трубки, каждый из которых расположен в одном из ее модулей. Кривая распределения потенциала вдоль оси трубки (относительно катода) изображена на рис. 25б.

В дрейфовых промежутках между участками ускорения расположены линзы (4) (рис. 25а) из постоянных магнитов, создающие аксиально-симметричное магнитное

поле. Кроме фокусировки пучка, линзы (прежде всего вторая и третья от катода) предназначены для сведения к минимуму возможных смещений пучка от оси трубки. На выходе из трубки расположена электромагнитная импульсная линза (5) (соленоид), создающая квазипостоянное поле. Распределение магнитной индукции  $B_z$  на оси тракта показано на рис. 25б.

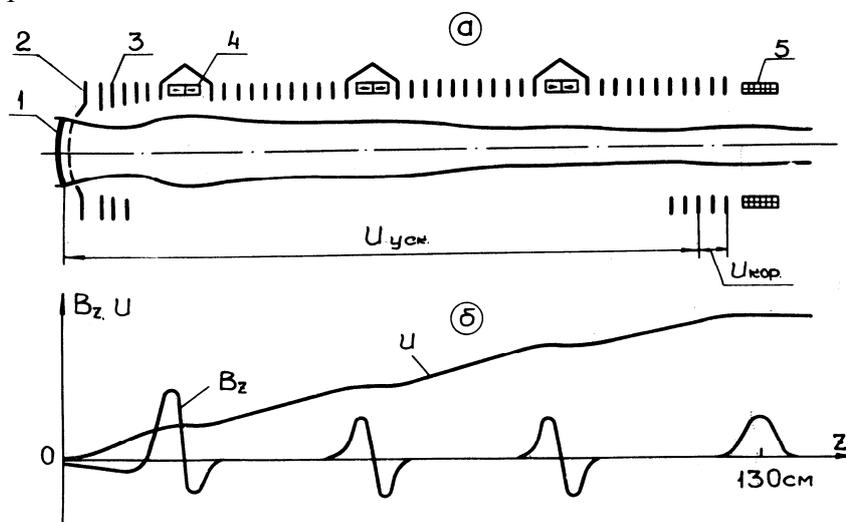


Рис. 25. Электронно-оптическая система ускорительной трубки ЭЛИТ-3А, стоявшей до 2003 года.

а – тракт и его элементы: 1 – катод электронной пушки; 2 – управляющая сетка; 3 – электроды трубки; 4 – линзы из постоянных магнитов; 5 – импульсная магнитная линза. б – кривые изменения потенциала вдоль трубки относительно катода ( $U$ ) и магнитного поля на оси ( $B_z$ ).

#### Пушка ЭЛИТ (до 2003 года)

Выбранная по совокупности различных соображений (опыт эксплуатации пушек с гексаборидлантановыми катодами в ранее разработанных ускорителях ЭЛИТ, допустимая мощность, потребляемая пушкой, с учетом возможностей охлаждения трубки и др.), плотность тока пучка на катоде  $\sim 10 \text{ А/см}^2$  при диаметре катода 30 мм еще позволяет обеспечивать в начальной части ускорения пучка условия, в какой-то мере близкие к требуемым оптикой Пирса, при допустимых градиентах электрического поля на электродах. На основании предварительных расчетов и возможностей конструкции была взята геометрия пучка с небольшим углом сходимости в начальной части (полный угол  $\sim 12^\circ$ , радиус кривизны катода  $R_k = 143 \text{ мм}$ ). Первые два электрода трубки расположены на расстояниях от катода соответственно 21 мм и 36 мм. Требуемые потенциалы на этих электродах (средние за время импульса тока)  $U_1 = 79 \text{ кВ}$  и  $U_2 = 124 \text{ кВ}$ .

Электронный пучок создается пушкой с борид-лантановым катодом ( $\text{LaB}_6$ ) диаметром 30 мм с сеткой. Обеспечивая запирающее напряжение с катода до и после рабочего импульса сетка выполняет еще несколько важных функций:

- а) позволяет сохранять неизменный ток пучка во времени при меняющихся за время импульса тока градиентах ускоряющего напряжения.
- б) обеспечивает равномерную плотность тока пучка на входе в ускорительный тракт, что при достаточно грубом выполнении требования оптики Пирса – без сетки – может не обеспечиваться;
- в) позволяет за счет увеличения сеточного напряжения поддерживать номинальный ток пучка при снижении эмиссии катода и продлить тем самым срок службы пушки.

Воздействие сетки на параметры пучка связано с изменением потенциала в этом месте по сравнению с "естественным" (при отсутствии сетки). Это, как известно, приводит к появлению углового разброса частиц в ячейках сетки и появлению соответствующего фазового объема.

Плотность тока с катода косвенного подогрева  $10-11 \text{ A/cm}^2$ . Время жизни катода составляло 1000-1200 часов. Размеры пучка на выходе из ускорительной трубки регулируются импульсной электромагнитной линзой, расположенной под трубкой.

Регулирование параметров блока управления электронной пушкой осуществляется с помощью изоляционных штоков (10, рис.22), проходящих к головке через днище ускорителя и высоковольтную колонну.

Этот пушечный узел имел два существенных недостатка:

Электроны, рассеянные на сетке, сильно отклонялись и попадали на изоляторы, вызывая регулярные пробой, что, в свою очередь, приводило к ионной бомбардировке катода и его последующему разрушению;

В существовавшей конструкции узла стыковки пушечного фланца с модулем ускорительной трубки в вакуумном уплотнении пушки после нескольких термоциклов появлялась течь элегаза ( $\text{SF}_6$ ) в трубку, отравляя катод.

Основные параметры ЭЛИТ до 2003 года:

Энергия, МэВ	1.65
Частота колебаний контура, кГц	12
Длительность импульса тока, мкс	10.5
Амплитуда тока пучка, А	52
Энергия в пучке, Дж	900

### Модернизация ЭЛИТ 2003 года

С целью повышения надежности инжекционной части комплекса ВЭПП4 в 2003 году была осуществлена модернизация ЭЛИТ-3А [34] Расчет новой оптики трубки был выполнен с использованием разработанной в ИЯФ программы САМ. С учетом предыдущего опыта [35] были выбраны нижеследующие параметры пушки, состоящей из нескольких микрокатодов:

- плотность электронного тока с катода;
- диаметр катода;
- количество микрокатодов.

В начале был выполнен расчет существующей трубки без тока, чтобы оценить электрическое поле и потенциал управляющей сетки. Затем было изучено поведение электронного пучка для одной, центральной ячейки. И наконец, была рассчитана огибающая пучка в трубке при наличии участка магнитных линз, начиная от поверхности сетки, с начальной энергией, равной потенциалу сетки и с величиной тока, определенной ранее. Одна из огибающих показана на рис. 26.

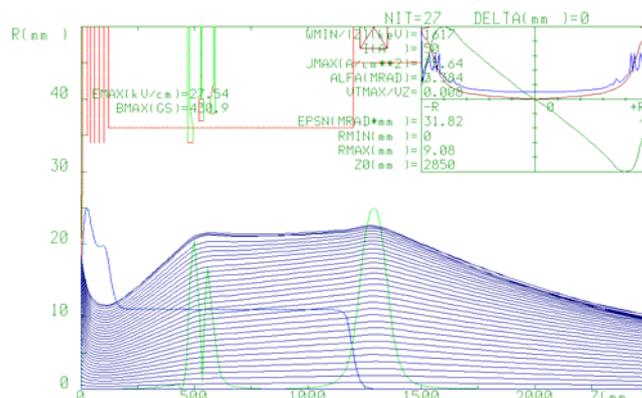


Рис. 26. Огибающая пучка в ускорительной трубке.

Эти результаты носят оценочный характер, поскольку двухмерная программа применялась к расчету существенно трехмерной системы. Тем не менее, это позволило:

- точно рассчитать электронный ток с пушки;
- оценить требуемые поля магнитных линз;
- упростить транспортную систему, уменьшив количество магнитных линз с трех до одной;
- уменьшить ток рассеянных электронов на изоляторы и электроды в ускорительной трубке.

Работающая ныне электронная пушка состоит из катода, формирующего электрода, подогревателя и сетки, смонтированных на фланце. Катод представляет собой графитовую матрицу диаметром 46 мм и кривизной 114 мм, в которой помещены 19 микрокатодов. Их параметры:

Материал эмиттера	LaB <sub>6</sub>
Диаметр	7.4 мм
Кривизна микрокатада	16 мм

Нагреватель представляет собой бифилярную танталовую спираль шириной 5 мм, толщиной 0.5 мм, общей площадью 40 см<sup>2</sup>. Одинаковость температуры всех микрокатодов лучше 20 градусов. Нагреватель смонтирован на опорах, проходящих через тепловые экраны. Танталовый прикатодный электрод является одновременно тепловым экраном.

Сетка, изготовленная из молибдена толщиной 4 мм, закреплена на стакане фокусирующего электрода, который, в свою очередь, монтируется на трех изоляторах, выведенных наружу пушечного фланца. Зазор сетка-катод равен 10 мм. 19 отверстий в сетке точно выставлены относительно микрокатодов. Для запираения тока достаточно напряжения около 500 В. При напряжении на сетке 28 кВ электронный ток около 50 А. Требуемая мощность нагрева 650 – 680 Вт.

На верхнем модуле трубки поставлен фланец с уплотнением "con-flat", что позволило значительно улучшить вакуумные условия в районе пушки.

На рис. 27 приведены фото "старой" (справа) и "новой" (слева) пушек. Отдельно показаны катодные узлы.



Рис. 27. Пушка ЭЛИТ до (справа) и после (слева) модернизации. Отдельно показаны катодные узлы.

В результате модернизации в трубке была оставлена только одна фокусирующая линза между вторым и третьим модулями в эквипотенциальной области, собранная из постоянных магнитов. С новой пушкой заметно уменьшилось токооседание в трубке

(с 2% до 0.2%), возросла электрическая прочность трубки, повысилась надежность. ЭЛИТ стал устойчиво работать в режиме 800–900 Дж в пучке, что дало возможность эффективнее работать с позитронами в ВЭПП4. Срок службы пушек заметно возрос. Если за период с 1986 г. по 2000 год замена пушек производилась 28 раз (~ 2 раза в год), то за период с 2003 г. по 2015 год замена пушек производилась всего 6 раз (~ 1 раз в 2 года).

#### 4.2. Импульсный гирокон

Источником СВЧ-мощности для ЛУ является импульсный гирокон мощностью 65 МВт [36, 37]. Конструктивная схема гирокона изображена на рис. 28. Электронный пучок, сформированный в ускорителе ЭЛИТ-3А (1), попадает в цилиндрический резонатор круговой развертки (2). Поперечное высокочастотное магнитное поле в приосевой области резонатора имеет круговую поляризацию (тип колебаний  $E_{110}$ ) и отклоняет пучок на угол  $\sim 5^\circ$ . Далее электроны, проходя в области магнитного поля первой отклоняющей системы ОС-1 (3), отклоняются на больший угол, а затем во второй отклоняющей системе ОС-2 (4) направляются в кольцевую щель выходного резонатора (5). Релятивистские электроны возбуждают в выходном резонаторе бегущую по азимуту электромагнитную волну  $E_{110}$  и, тормозясь в электрическом поле, отдают свою энергию. Через нижнюю кольцевую щель электроны покидают выходной резонатор и собираются коллектором (6). Высокочастотная мощность выводится из выходного резонатора двумя волноводами (7) через отверстия связи, сдвинутые по азимуту на  $90^\circ$ .

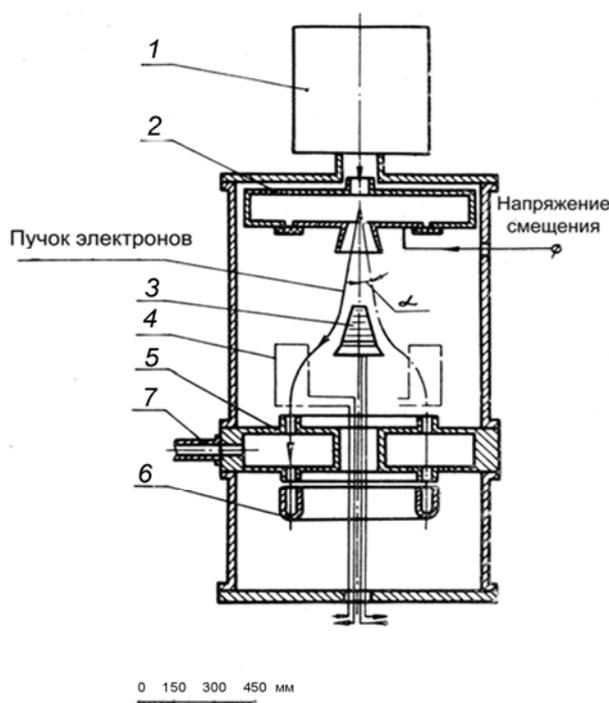


Рис. 28. Схема импульсного гирокона.

1 – источник электронов (ЭЛИТ-3А); 2 – резонатор развертки; 3 – первая отклоняющая система; 4 – вторая отклоняющая система; 5 – выходной резонатор; 6 – коллектор; 7 – вывод высокочастотной энергии.

Для диагностики параметров пучка, сформированного источником (1) в гироконе предусмотрены два пробника. Первый расположен на входе в резонатор развертки, второй - между резонатором развертки и первой отклоняющей системой.

Источники питания элементов гироконя выполнены на базе разработанных в Институте унифицированных импульсных генераторов напряжения и источников постоянного тока и напряжения. Управление ими и контроль параметров осуществляется автоматизированной системой на основе ЭВМ. Она обеспечивает по команде с алфавитно-цифрового дисплея включение всех устройств в заданный режим, изменение режима и контроль текущего состояния установки. Кроме того, на гироконе контролируются уровни ВЧ сигналов после их детектирования, а также токооседание в электронно-оптическом тракте. Исследование функциональных зависимостей и оптимизация режимов производится также с помощью ЭВМ. Изменение режимов питания и измерительных элементов осуществляется дискретно с минимальным шагом по амплитуде 0.15% и по времени 0.1 мс.

Канал транспортировки пучка между ЭЛИТ-3А и резонатором развертки включает в себя ламельный пробник и фокусирующую линзу. Ламельный пробник имеет четыре плоских изолированных графитовых ламели, которые образуют контур с отверстием для прохождения пучка в центре диаметром 40 мм. Пробник позволяет контролировать, по токооседанию на ламелях, размер и положение электронного пучка на входе в резонатор развертки. Фокусирующая линза выполнена в виде соленоида (25 витков, средний диаметр 84 мм), отделенного от вакуумной камеры канала тонкой трубой из нержавеющей стали и обеспечивает на оси канала магнитную индукцию  $\sim 2$  кГс при токе в обмотке 400 А. Фокусное расстояние при энергии электронов 1.6 МэВ равно 0.16 м.

Резонатор развертки схематически изображен на рис. 29. Конструкция предусматривает: два ввода мощности (6), расположенные на обечайке (1) и сдвинутые по азимуту на  $90^\circ$ ; два стержня настройки частоты (7), установленные напротив вводов мощности; четыре компенсатора неоднородности резонатора (8) и четыре датчика напряжения (9), размещенные на верхней торцевой крышке. Электрический контакт торцевых стенок с обечайкой обеспечивается индиевой прокладкой. Исследования переходного контакта медь-индий-медь показали [38], что при значительно меньших

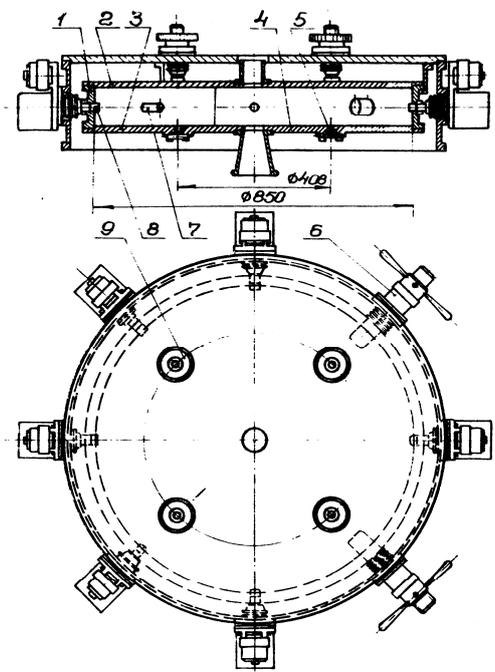


Рис. 29. Резонатор развертки.

1 – обечайка; 2 и 3 – торцевые стенки; 4 – внутренний диск нижней торцевой стенки; 5 – изолятор; 6 – ввод мощности; 7 и 8 – подстройка частоты и компенсатор неоднородностей; 9 – емкостной датчик напряжения.

усилиях в соединении такой контакт обладает меньшим удельным сопротивлением по сравнению с контактом медь-медь.

Вводы мощности выполнены в виде петель, индуктивность которых компенсирована емкостью на рабочей частоте. Петли отделены от вакуумного объема керамическими колпаками. Это дает возможность исключить резонансный высокочастотный разряд (РВР) во вводах, а также оперативно менять геометрические размеры петли без нарушения вакуума в установке.

Для подавления РВР в нижней торцевой стенке резонатора прорезана кольцевая щель. Щель расположена в узле радиальных поверхностных токов и не вносит возмущений в распределение ВЧ полей. На изолированную центральную часть стенки подается постоянное напряжение смещения, которое и препятствует развитию разряда. При первых включениях требуемая величина смещения достигает + 8 кВ, по мере обезгаживания и тренировки уменьшается до + 2 кВ.

Отверстие для выхода электронного пучка из резонатора снабжено запердельным волноводом.

В таблице 4.1. приведены основные параметры и характеристики резонатора развертки.

**Таблица 4.1. Основные параметры резонатора развертки**

Рабочая длина волны, м	0.7
Диаметр резонатора, м	0.85
Высота резонатора, м	0.12
Диапазон перестройки по частоте, МГц	+0.16
Характеристическое сопротивление для колебаний $E_{110}$ (стоячая волна), Ом	38
Собственная добротность	18000
Угол отклонения электронного пучка, град	5
Мощность, потребляемая резонатором, кВт	150

ВЧ система питания резонатора развертки (рис. 30) условно может быть разделена на несколько основных частей: усилитель мощности с устройствами сложения и деления мощности, реализованными на кольцевых мостах (МС, МД), элементами фазирования (ФСДЛ) и вводами мощности в резонатор с устройствами согласования (Ш1 ÷ Ш4); предварительный усилитель с термостатированным перестраиваемым по частоте задающим генератором; анодный импульсный модулятор; система контроля и стабилизации настройки резонатора по частоте и фазе.

Все каскады усилителей мощности выполнены по схеме с заземленной сеткой на металлокерамических триодах ГС-30 и ГИ-39Б. Высокостабильный задающий генератор (суточный уход частоты не превышает  $10^{-6}$ ) изготовлен в виде отдельного блока с выходной мощностью 5 Вт в стандарте "Вишня" и расположен вдали от усилителей мощности для исключения воздействия импульсных наводок. Анодный импульсный модулятор выполнен на тетраде ГМИ-14Б, работающем в ключевом режиме с подачей импульса на сетку от формирующей линии с двумя разрядными тиратронами, позволяющими плавно регулировать длительность импульса.

Непрерывный сигнал от задающего генератора (ЗГ) подается на предварительный усилитель мощности (коэффициент усиления ~ 35 дБ), после которого разветвляется на четыре канала системой из кольцевого моста и двух направленных ответвителей с переходным ослаблением 3 дБ. Затем через фазосдвигающие линии сигнал поступает на оконечные усилители. Полная мощность получается сложением сигналов с этих усилителей на мостах МС1 и МС2. Применение пассивных элементов для сложения и деления мощности существенно облегчает настройку генератора, делает систему устойчивой при достаточно высоких анодных напряжениях. Критерием правильной

настройки каскадов является минимум мощности в балластных нагрузках ( $R_{\delta}$ ) при постоянном уровне на выходе каскадов. Автоподстройка частоты резонатора осуществляется автономной аналоговой системой при сравнении фазы сигналов падающей волны и напряжения на резонаторе в момент прохождения пучка. Подстройка фазы ведется аналогичным образом, но путем сравнения фазы напряжений ортогональных типов в резонаторе.

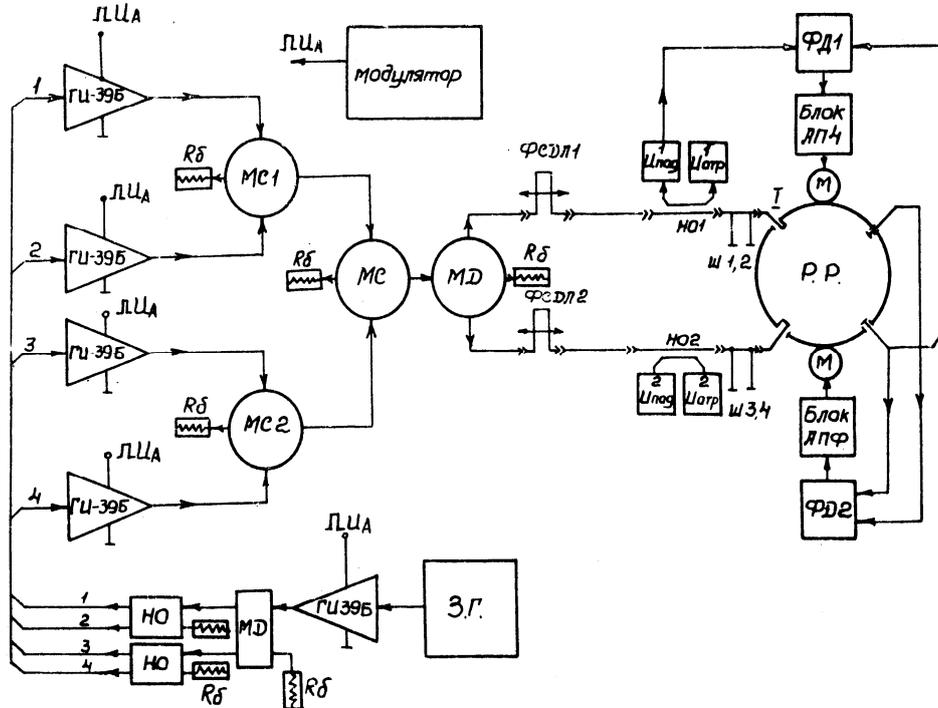


Рис. 30. Схема ВЧ усилителя мощности для возбуждения резонатора развертки.

Блок отклоняющих систем (рис. 31) состоит из двух частей. Первая (ОС-1) представляет собой конусную катушку, которая создает магнитное поле с продольной и радиальной составляющими и служит для увеличения угла отклонения пучка, прошедшего резонатор развертки, до величины  $\sim 45^\circ$ . Катушка содержит десять витков,

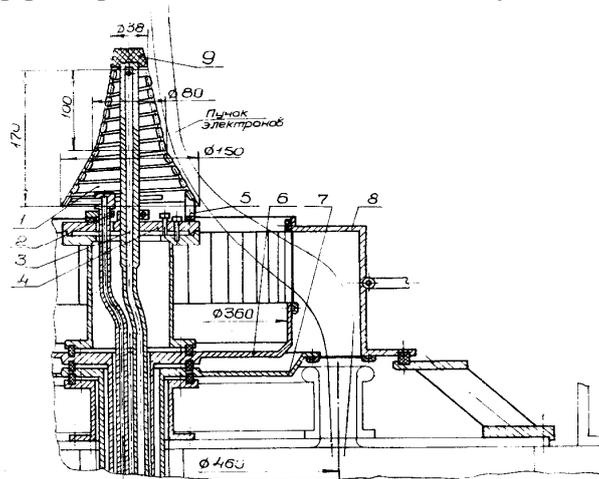


Рис. 31. Блок отклоняющих систем.

1 – конусный соленоид (ОС-1); 2,3,6,7 – токоподводы; 4 – опорный фланец; 5 – крепление нижнего витка соленоида; 8 – охлаждаемый токоведущий корпус (ОС-2); 9 – защитный графитовый колпачок.

выполненных из медной трубки, внутри которой протекает охлаждающая систему вода. Для защиты верхней части катушки от разрушения при случайном попадании пучка, она закрыта графитовым колпачком.

Вторая часть (ОС-2) выполнена в виде коаксиальных электродов, вдоль которых течет ток, создающий азимутальное магнитное поле. Таким образом, пучок, проходя вторую отклоняющую систему, направляется перпендикулярно торцевым стенкам выходного резонатора. Пронизываемые пучком поверхности образованы проволочными перемычками, симметрично расположенными по азимуту. Конструктивная прозрачность каждой такой поверхности для электронного пучка составляет 97.5%.

Оптимизация геометрии и местоположения отклоняющих систем производилась по результатам численных расчетов траекторий граничных электронов. Задача состояла в том, чтобы спроектировать такую отклоняющую систему, которая вписывалась в заданные конструктивные размеры гирокон и обеспечивала проводку пучка в коллектор с минимальными потерями тока при заданных параметрах пучка (диапазон рабочей энергии электронов  $1500 \div 1600$  кэВ, ток 40 – 50 А). При численном моделировании учитывалась неоднородность магнитного поля вблизи поверхностей второй отклоняющей системы, образованных проволочными перемычками, а также расфокусировка пучка в выходном резонаторе в процессе взаимодействия с ВЧ полем возбуждаемой в нем бегущей волны. Расчеты показали, что при выбранной геометрии блока отклоняющих систем суммарное токооседание в электронно-оптическом тракте не превышает 6%.

Выходной резонатор гирокон (рис. 32) выполнен в виде цилиндра. Для прохождения электронного пучка в верхней и нижней торцевых стенках имеются кольцевые щели, расположенные в узлах радиальных поверхностных токов. Крепление центральных частей стенок осуществляется металлической трубой малого диаметра, установленной соосно с обечайкой резонатора.

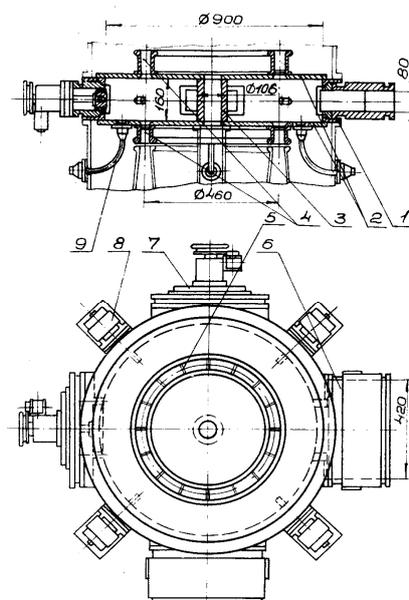


Рис. 32. Выходной резонатор.

1 – обечайка; 2 – торцевые стенки; 3 – внутренний цилиндр; 4 – запердельные волноводы; 5 – металлические перемычки; 6 – вывод энергии; 7,8 – механизмы подстройки частоты; компенсации неоднородностей; 9 – емкостной датчик напряжения.

Измерения параметров резонатора после его монтажа в установке показали, что за счет излучения через кольцевые щели возникает сильная связь резонатора с внешними полостями. Это приводит к падению добротности с  $Q_0 = 17000$  до  $Q_0 \sim 3000$ . С целью уменьшения излучения кольцевые щели в торцевых стенках были снабжены запердельными волноводами, замкнутыми на концах металлическими перемычками, равномерно расположенными по азимуту. Прозрачность обеих поверхностей для электронного пучка составляет 99%, а нагрев перемычек при работе в импульсном режиме мал. Другой способ ослабления излучения из щелей, четвертьволновая ловушка, имеет более сложное конструктивное исполнение и может применяться при создании гироконов большой средней мощности. Эксперименты, проводившиеся на модели, показали, что ослабление излучения составляет  $> 20$  ДБ.

В конструкции выходного резонатора не предусмотрена возможность подачи постоянного смещения для подавления РВР. Однако опыт работы показал, что после непродолжительной тренировки трудностей в прохождении зон высокочастотного разряда не возникает.

Передача мощности от гирокона в линейный ускоритель осуществляется двумя волноводами одинаковой длины, каждый из которых нагружен на отдельную секцию ускоряющей структуры. При этом сдвиг фаз между ускоряющими полями двух секций равен  $90^\circ$ , что позволяет ускорять частицы только в одном направлении. Такая схема максимально проста и обеспечивает сохранение бегущей волны в выходном резонаторе гирокона во время переходного процесса, а ускорения частиц в противоположном направлении не требуется.

Длины волноводов выбраны кратными  $\lambda_v / 2$  ( $\lambda_v$  – длина волны в волноводе), и система выходной резонатор – волновод – ускоритель возбуждается на колебаниях вида  $\pi/2$ , что позволяет реализовать известные достоинства этого типа колебаний. При таких длинах есть небольшой проигрыш в энергетике переходного процесса по сравнению с вариантом, когда длины волноводов кратны  $(\lambda_v / 4)^{(2n + 1)}$ , однако, есть и преимущества: более благоприятные условия работы с точки зрения электрической прочности, возможность работы в слабоперенапряженном режиме (т.е. более устойчивом к изменению нагрузки), меньшие размеры окон связи).

Настройка установки включает в себя получение наилучшего токопрохождения в коллектор гирокона при расстроенном выходном резонаторе и, затем, подбор связи с ЛУ для достижения максимального ускоряющего напряжения. Оптимизация токопрохождения в коллектор проводилась путем настройки круговой поляризации, подбора амплитуды отклоняющего ВЧ поля в резонаторе развертки и режимов элементов электронно-оптического тракта гирокона. Качество круговой поляризации определялось вращающейся петлей, которая помещалась в центре верхней торцевой стенки резонатора развертки, а настройка производилась компенсаторами неоднородности. В результате настройки получается поляризация, отличающаяся от круговой не более чем на  $\pm 1\%$ ,

Для увеличения срока службы триодов ГИ-39 в каскадах усилителя мощности ГВЧ в 1999 году была собрана схема, позволяющая снижать напряжение накала на триодах в режимах, не требующих накопления тока в ВЭППЗ (режим "Эксперимент"). В результате, если за период с 1989 по 1999 годы в ГВЧ было заменено 179 триодов (в среднем 16.3 триода в год), то за период с 2000 по 2009 годы заменили 32 триода (в среднем 3.2 триода в год), как показано на рис. 33. Таким образом, срок службы триодов ГИ-39 увеличился в 5.1 раза.

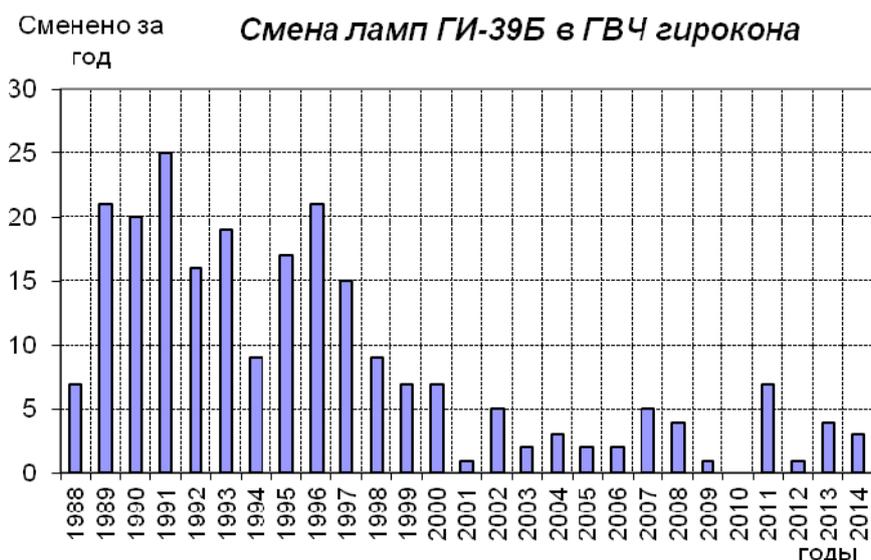


Рис. 33. Замена ламп ГИ-39Б импульсного гирокона.

### 4.3. Линейный ускоритель

Схема и конструкция ускоряющей структуры ЛУ должны обеспечивать большую накопленную энергию и высокую электрическую прочность при относительной простоте. Данным требованиям при выбранной рабочей моде  $\pi/2$  удовлетворяет бипериодическая структура на частоте 430 МГц с аксиальным расположением резонаторов связи [39, 40, 41].

Поскольку мощность из гирокона выводится через два вывода энергии, ЛУ выполнен в виде двух отдельных секций (рис. 34), каждая из которых содержит по 10 ускоряющих резонаторов (1), в промежутках между которыми расположены 9 резонаторов связи (2).

Возбуждается ускоряющая структура от гирокона через два одинаковых вакуумных волновода со сдвигом фаз  $90^\circ$ . Для компенсации этого сдвига между секциями ЛУ предусмотрен промежуток, который используется также для размещения линзы, средств наблюдения за пучком и корректоров. Инжекция электронов в ЛУ производится из диодной пушки (10).

Для получения максимального выхода позитронов в заданном эмиттансе пучок ускоренных электронов необходимо сфокусировать на конвертер (12) в пятно минимального размера,  $1 \div 1.5$  мм. Чтобы обеспечить такой размер пятна на конвертере, пучок фокусируется дважды. Сначала электроны фокусируются длиннофокусной линзой так, чтобы получить минимальный размер пучка на выходе ускорителя ( $\sim 1$  см). Затем короткофокусной линзой (11) производится фокусировка пучка на конвертере (12).

Энергетический разброс электронов в ЛУ составляет  $\Delta E/E = 25 \div 30\%$ . Двойная фокусировка, применяемая в ЛУ, позволяет получить отношение размера пучка на конвертере к размеру пучка в ЛУ, пропорциональное  $(\Delta E/E)^2$ , и является более эффективной, чем однократная фокусировка, при которой отношение указанных размеров не может быть лучше, чем  $\Delta E/E$ .

Поскольку потери в структуре ЛУ не являются параметром первостепенной важности, цилиндрические детали наружного корпуса ЛУ изготовлены из алюминиевого сплава АК6. Этот сплав имеет удельную проводимость в 2.3 раза меньше, чем медь, но позволяет облегчить и удешевить конструкцию. Торцевые стенки резонаторов изготовлены из меди М1, т.к. она обеспечивает большую электрическую прочность. С этой же целью медные стенки обработаны путем механической

полировки вольфрамовой проволокой и электрохимической полировки до шероховатости, соответствующей  $R_a = (0.16 - 0.32)$  мкм. Стенки соединяются с обечайками через прокладки из индиевой проволоки, обеспечивающей высококачественный ВЧ контакт [38].

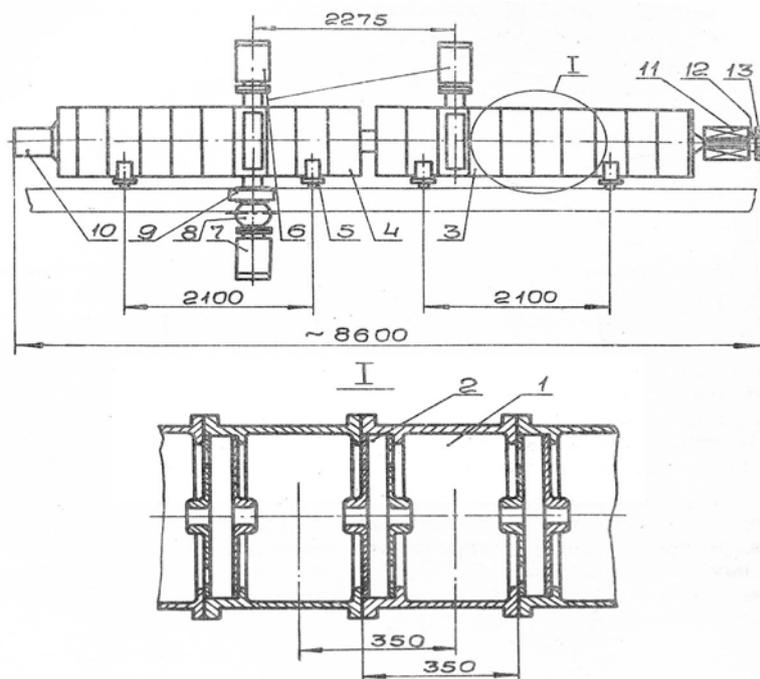


Рис. 34. Схема линейного ускорителя.

1 – ускоряющий резонатор; 2 – резонатор связи; 3, 4 – секции ЛУ; 5 – регулируемые опоры; 6 – подстройки частоты ЛУ; 7 – магнитоотрядный насос; 8 – азотная ловушка; 9 – вакуумный шиббер; 10 – инжектор; 11, 13 – магнитные линзы; 12 – конвертер.

Конструктивно каждая секция ЛУ собирается из отдельных блоков длиной  $\lambda/2$ , в состав которых входят ускоряющий резонатор и резонатор связи. Блоки соединены между собой также через индиевые прокладки. В состав структуры ЛУ входят блоки трех типов: основные блоки (рис. 35) – 17 штук, технические блоки – 2 шт. и инжекционный блок (рис. 35 и 36) – 1 шт. В каждом блоке предусмотрены измерительные петли для контроля напряжения в резонаторах и неоперативные элементы подстройки индуктивного характера типа плунжеров для компенсации разбросов собственных частот резонаторов.

С целью получения максимальной электрической прочности в конструкции ЛУ применяются только металлические (индиевые и медные) вакуумные уплотнения, а в качестве изоляторов (например, в измерительных петлях) используется керамика 22ХС. Из тех же соображений откачка структуры ЛУ производится магнитоотрядными насосами типа НОРД-250, обеспечивающими безмасляный вакуум с давлением не хуже  $3 \cdot 10^{-6}$  Па.

Сборка структуры производится так, чтобы щели на противоположных стенках резонаторов связи были развернуты друг относительно друга на  $90^\circ$  для устранения непосредственной связи ускоряющих резонаторов.

Инжекционный блок представляет собой половину основного ускоряющего резонатора. В ускоряющем резонаторе технического блока установлен подстроечный элемент большого объема с электромеханическим приводом, предназначенный для коррекции частоты секции в целом. В этом же резонаторе предусмотрены отверстия для вакуумной откачки всей секции и отверстие связи с вакуумированным

прямоугольным волноводом сечения  $420 \times 80$  мм<sup>2</sup>, по которому подводится ВЧ мощность от гирокон.

Ускоряющие резонаторы имеют следующие параметры: добротность  $2 \cdot 10^4$ , шунтовое сопротивление 4 МОм, коэффициент пролета 0.84. Через две диаметрально расположенные щели в торцевых стенках ускоряющие резонаторы связаны с резонаторами связи (рис. 35). Щели обеспечивают коэффициент связи 0.1.

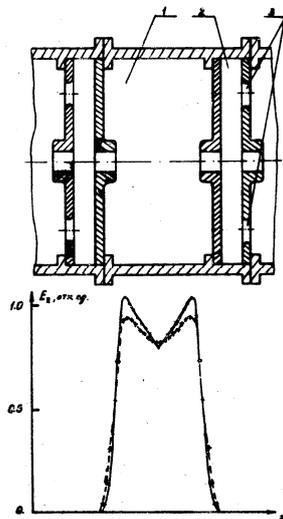


Рис. 35. Основной резонатор и распределение электрического поля вдоль оси.  
1 – основной резонатор; 2 – резонатор связи; 3 – щели связи. • – распределение, снятое на электролитической ванне. + – расчет по программе.

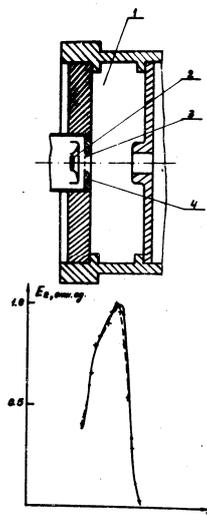


Рис. 36. Инжекционный резонатор и распределение электрического поля вдоль оси в варианте "внутренней инжекции".  
1 – инжекционный резонатор; 2 – пушка Пирса; 3 – сетка; 4 – входная стенка. • – распределение, снятое на электролитической ванне. + – расчет по программе.

В первый резонатор ЛУ инжектируется несгруппированный электронный пучок. Длительность импульса инжектируемого тока выбрана около 27 нс – несколько меньше времени одного оборота в синхротроне Б-4, что обеспечивает эффективный однооборотный захват в Б-4. Вследствие этого ускорение электронов в ЛУ происходит за счет энергии, запасенной в резонаторах. Количество ускоряемых частиц выбрано таким, чтобы они при ускорении отбирали около 30% энергии, запасенной в резонаторах. Это приводит к уменьшению кинетической энергии электронов за время импульса инжекции на 15% (ниже этот эффект будем называться "подсадкой").

Дальнейшее увеличение количества электронов не дает существенного роста позитронов, во-первых, из-за увеличения энергетического разброса электронов, а, во-вторых, вследствие ухудшения прохождения пучка через ускоряющую структуру. В зависимости от длительности импульса инжекции принятая величина инжектируемого тока изменяется в пределах  $150 \div 200$  А.

В первом резонаторе ЛУ происходит разбиение несгруппированного пучка на сгустки. Фазовая протяженность сгустка  $\Delta\varphi = 120^\circ$ , причем почти все частицы из этого интервала фаз проходят до конца ускоряющей структуры. Однако в достаточно малое пятно на конвертере могут быть сфокусированы только те частицы, энергетический разброс которых  $\Delta E/E \leq 30\%$ , что соответствует интервалу фаз  $60^\circ$  (с учетом подсадки).

Можно показать, что на долю тех частиц, которые ускоряются, но дают малый вклад в выход позитронов, приходится  $\sim 1/3$  энергии, уносимой из резонаторов всем ускоряемым пучком. Такие потери являются хотя и заметной, но всё же приемлемой "платой" за выбранную для ЛУ простейшую схему инжекции. Создание же инжектора сгруппированного электронного пучка с пиковым током  $150 \div 200$  А и фазовой протяженностью меньше  $60^\circ$  представляет серьезную проблему.

В режиме инжекции электронов существуют два возможных режима: 1) обе секции в фазе, но напряжение на них по 3.5 МВ; 2) пучок ускоряется в первой секции ЛУ и тормозится во второй. В результате энергия электронов на выходе ЛУ составляет 7 МэВ, что соответствует энергии инжекции в синхротрон Б4. Работа ЛУ на накопленной энергии позволяет реализовать такой режим после окончания импульса накачки, когда в ускоряющей структуре остаются только затухающие свободные колебания. При этом вторая секция перестраивается по частоте относительно первой, а ускорение электронов производится в момент времени, когда напряжения в секциях оказываются противофазными. Перестройка осуществляется прогибом стенки последнего ускоряющего резонатора второй секции ЛУ. В первом варианте ток меньше, т.к. темп ускорения в ЛУ существенно ниже и влияние пространственного заряда в пучке больше; поэтому реально работа комплекса ведется во втором режиме.

В пределах выбранной схемы инжекции рассматривались два варианта. В первом из них, так называемой "внутренней инжекции", параллельный электронный пучок инжектируется непосредственно в резонатор из диодной пушки Пирса, которая отделена от полости резонатора сеткой. Динамика пучка в инжекционном резонаторе определяется формой входной стенки. В качестве первого приближения инжектора использовалась электронно-оптическая схема ИЛУ-2 [10, 42]. В варианте "внутренней инжекции" можно варьировать в широких пределах ток пучка изменением расстояния катод-сетка.

Во втором варианте – "внешняя инжекция" – электронный пучок транспортируется на вход ЛУ по электронно-оптическому каналу (рис. 37). На входе ЛУ имеется магнитная линза, с помощью которой можно оперативно изменять начальные параметры пучка. В этом варианте использовалась электронная пушка с микропервеансом  $p_\mu \approx 0.9$ , описанная в [43]. Изменение же тока за счет уменьшения зазора катод-анод сильно влияет на геометрические параметры пучка. Для питания электронных пушек разработан генератор на 200 кВ [44].

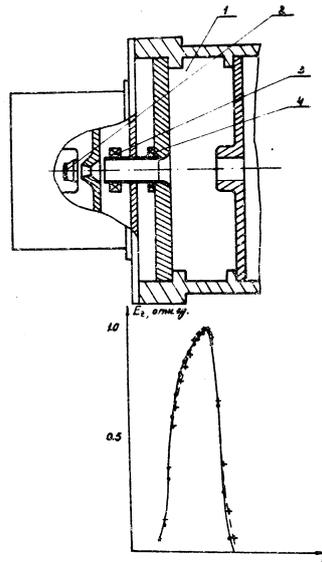


Рис. 37. Инжекционный резонатор и распределение электрического поля вдоль оси в варианте "внешней инжекции".

1 – инжекционный резонатор; 2 – электронная пушка; 3 – магнитная линза; 4 – корректор. • – распределение, снятое на электролитической ванне. + – расчет по программе.

Конструкция инжектора приведена на рис. 38 [42]. Инжекция параллельного пучка электронов происходит из диодной пушки Пирса с плоским катодом и сетчатым анодом, обеспечивающей необходимые геометрические параметры пучка. Большое значение для формирования пучка имеет геометрия входной стенки инжекционного резонатора. На рис. 38 представлены два варианта исполнения последней. В первом варианте форма подбиралась на электролитической ванне.

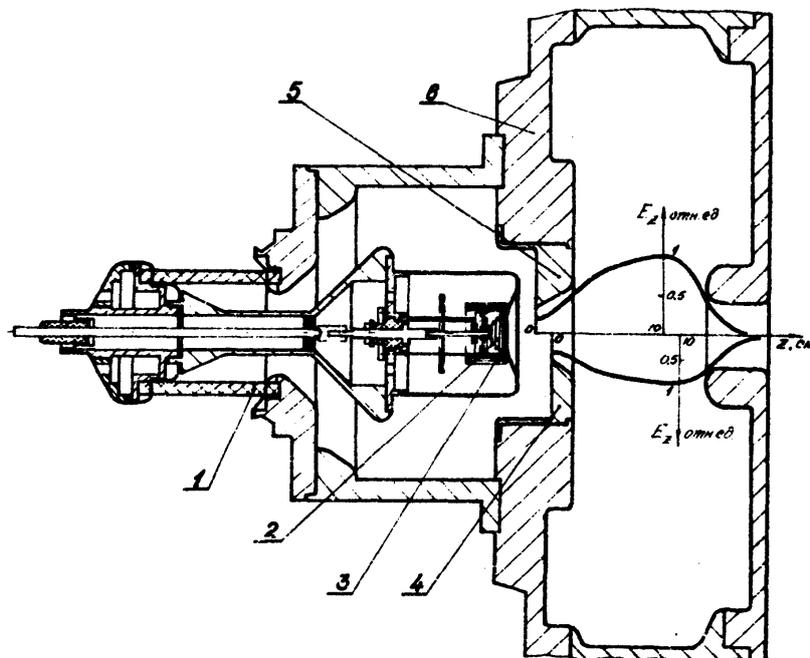


Рис. 38. Конструкция инжектора и распределение электрического поля вдоль оси для двух вариантов входной стенки инжекционного резонатора: 1 – высоковольтный керамический ввод; 2 – спиральный нагреватель; 3 – металлосплавный катод; 4 – первый вариант сетчатого анода - воронки; 5 – рабочий вариант анода; 6 – входная стенка инжекционного резонатора.

Развитие вычислительных методов и создание на их основе комплекса программ для расчета динамики сильноточного пучка в ЛУ [40, 46] позволили подобрать более оптимальную форму входной стенки. Результаты численного моделирования, представленные на рис. 39, показывают, что в инжекционном резонаторе (рабочий вариант) можно сформировать сходящийся пучок с пиковым током 300 А при энергии инжекции 200 кэВ.

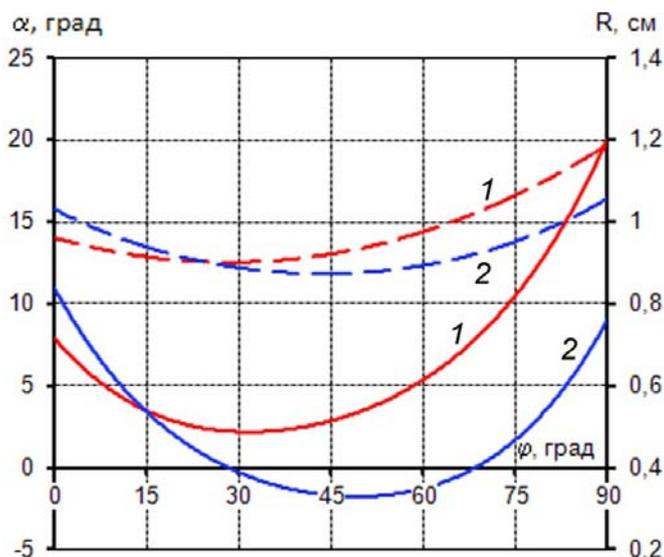


Рис. 39. Зависимости угла расходимости  $\alpha$  (сплошные линии) и радиуса пучка (пунктир) на выходе инжекционного резонатора от фазы  $\varphi$  влета. Энергия инжекции 200 кэВ, ток инжекции 300 А, напряжение на резонаторе 1,7 МВ. 1 – первый вариант (глубина воронки 1,45 см, угол наклона  $35^\circ$ ); 2 – рабочий вариант (глубина воронки 2,85 см, угол наклона  $30^\circ$ ).

Электроны инжектируются в ЛУ подачей отрицательного импульса высокого напряжения на катод электронной пушки. Высоковольтный керамический ввод рассчитан на напряжение до 300 кВ. Работа ЛУ исследовалась при энергии инжекции от 50 до 270 кэВ с использованием мощного 300 кВ генератора наносекундных импульсов [44]. Эти эксперименты позволили оптимизировать систему инжекции как по току, так и по напряжению.

С 1978 года в качестве источника питания инжектора ЛУ используется генератор, имеющий меньший диапазон напряжений (до 200 кВ), но обладающий лучшими эксплуатационными характеристиками. Генератор выполнен на газонаполненных разрядниках по схеме Введенского и формирует импульс на одковитковых индукторах импульсного трансформатора Кристофилоса (ТИН-200), смонтированного на высоковольтном вводе пушки. При этом во вторичном контуре ТИН-200 на рабочем зазоре пушки возникает высоковольтный импульс напряжения. Примененная схема ввода легко решает проблему подачи накала на пушку.

Для обеспечения необходимых токов инжекции в электронной пушке применяется "чистый" катод из сплава иридий-лантан [45], изготовленного металлургическим способом. В отличие от гексаборида лантана он более чувствителен к вакууму, но зато имеет более низкую работу выхода, более низкие коэффициенты спектрального и интегрального излучения и, что особенно существенно при одинаковых условиях нагрева, имеет в сотни раз меньшую скорость испарения. При наличии вакуума лучше  $10^{-7}$  Торр эмиссия металлосплавного катода практически не зависит от состава остаточного газа, исключая элегаз ( $\text{SF}_6$ ), который существенно влияет на эмиссию. Кислородное отравление катода обратимо: эмиссия полностью восстанавливается после уменьшения давления.

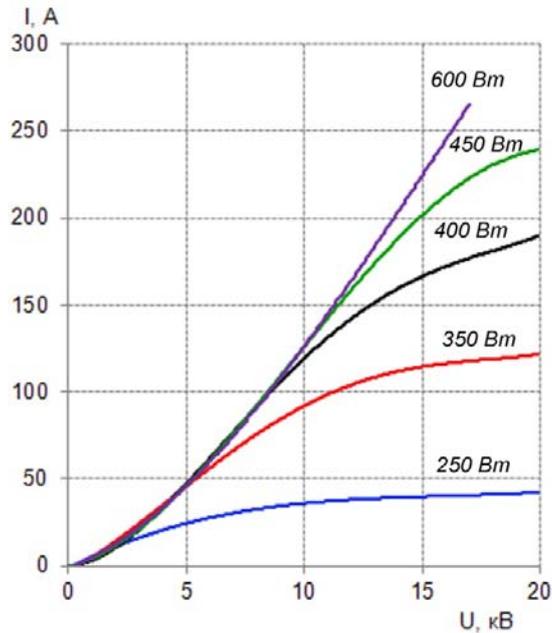


Рис. 40. Вольтамперные характеристики катодного узла с эмиттером из сплава иридия с лантаном в зависимости от подведенной мощности. Вакуум  $5 \cdot 10^{-7}$  Торр.

Экспериментальные вольтамперные характеристики пушки с катодом диаметром 30 мм, снятые в микросекундном импульсном режиме на стенде (рис. 40), показывают высокую эффективность иридий-лантанового катода. Из характеристик видно, что пушка обеспечивает ток более 200 А уже при мощности накала около 450 Вт (плотность тока на катоде при этом около  $30 \text{ А/см}^2$ ). Пушка с эмиттером из гексаборида лантана требовала бы при этом более 550 Вт. Имевшийся опыт эксплуатации гексаборида лантана (с плотностью эмиссии около  $30 \text{ А/см}^2$ ) в ЛУ показал, что для поддержания необходимой эмиссии со временем требуется увеличение подводимой мощности накала пушки, что приводит к возрастанию и без того высокого распыления материала катода. При этом снижается электрическая прочность резонатора.

Подведение необходимой мощности к катоду (см. рис. 38) обеспечивается спиральным нагревателем из вольфрамовой проволоки. Все другие элементы катодного узла выполнены в основном из тантала.

Средний срок непрерывной работы пушки  $\sim 30000$  ч.

На первом этапе проектирования линейного ускорителя, когда рассматривалось большое количество вариантов, была разработана система расчетных программ, удовлетворяющих требованиям необходимой точности, простоты, оперативности и минимального времени счета. Были разработаны программы LANS [47] и MASON [46], основанные на более точном вычислении электромагнитных полей в ВЧ-резонаторах и более точной динамической модели интенсивного релятивистского пучка. Программы вычисляют движение частиц в переменном электромагнитном поле с учетом объемного заряда пучка. В результате счета выдаются траектории движения от 1 до 9 частиц с различными начальными условиями, а также распределение частиц по радиусу, углу и энергии.

Целью расчетов была оптимизация параметров линейного ускорителя и инжектируемого пучка для получения на выходе ЛУ пучка электронов диаметром  $< 1$  см при энергетическом разбросе  $\leq 30\%$ . Такие выходные параметры обеспечивают максимальное использование пучка электронов для получения позитронов. При оптимизации угла влета вариант "внешней инжекции" практически совпадает с вариантом

"внутренней инжекции", поэтому все расчетные результаты приведены для последнего.

Большая часть расчетов посвящена движению пучка в первом (инжекционном) резонаторе, где энергия электронов невелика и относительно велико время пролета. Здесь внешние поля и собственный заряд пучка оказывают наибольшее влияние на движение пучка по сравнению с последующими резонаторами. Численное моделирование позволило оптимизировать длину инжекционного резонатора с целью получения необходимых геометрических параметров лучка. В расчетах напряжение на ускоряющем зазоре изменялось вместе с его длиной так, чтобы оставалась неизменной напряженность ускоряющего электрического поля. В итоге расчетов длина ускоряющего зазора инжекционного резонатора была выбрана равной 10 см, что составляет половину длины основного резонатора.

Для оценки влияния собственного поля пучка на движение частиц в первом резонаторе были проведены расчеты движения пучка при различных энергиях инжекции и токах пучка. При уменьшении энергии инжекции и увеличении тока пучка происходит уменьшение интервала фаз, при которых пучок остается сходящимся. При токе 400 А пучок на выходе инжекционного резонатора становится расходящимся, что ограничивает ускорение большого тока. Изменения энергии инжекции без изменения тока мало влияют на параметры пучка из-за большого темпа ускорения.

Для оценки влияния внешних полей, в частности, нелинейности радиальной составляющей электрического поля  $E_R(R)$ , был проведен расчет траекторий частиц, вылетающих с разных радиусов катода. Было показано, что из-за нелинейности радиальной составляющей электрического поля происходит слабое перемешивание слоев пучка. Перемешивание происходит после 3-4 резонаторов при энергии 8 – 12 МэВ, когда влиянием собственного поля пучка можно пренебречь. Расчеты движения пучка в первой секции ускорителя показали, что без дополнительных фокусирующих полей можно ускорить токи, максимально допустимые по подсадке напряжения на резонаторах. При этом размер пучка для некоторого интервала фаз близок к апертуре ускорителя.

Как было сказано выше, между секциями ЛУ имеется фокусирующая линза, которая дает возможность оптимизировать геометрические параметры пучка на выходе ЛУ. На рис. 41 показаны траектории крайних электронов по всей длине ускорителя для различных фаз при трех значениях ускоряющего напряжения, что соответствует изменению напряжения на резонаторах в течение импульса инжекции ("подсадка"). Из рисунка видно, что используя линзу между секциями, можно получить пучок нужных (1 см) параметров с учетом "подсадки" напряжения на резонаторах. Зависимость энергии частиц, радиальное отклонение и угол наклона в конце ускорителя приведены на рис. 42. Используя приведенные характеристики, можно оценить ускоренный ток и рассчитать спектр электронов на выходе ЛУ.

Вычисления показывают, что до конца ускоряется, примерно, третья часть частиц, т.е.  $I_{\text{уск}} \approx I_0/3$ . Однако, только одна шестая часть пучка имеет энергетический разброс  $\sim 15\%$  и может быть эффективно использована для конверсии в позитроны.

На первом этапе (1975 год) эксперименты проводились с одним (инжекционным) резонатором. Возбуждением резонатора от лампового ВЧ генератора было получено ускоряющее напряжение порядка 500 кВ. На входе резонатора располагалась пушка "внутренней инжекции" с микропервеансом 1.5. На выходе – фокусирующая линза, система щелей для измерения геометрических параметров пучка и поворотный магнит с цилиндром Фарадея для измерения энергии. Пучок визуально наблюдался на экране телевизора с пробников, покрытых люминофором. Учитывая небольшой запас энергии в резонаторе, ток инжекции  $I_0 = 40$  А и энергия инжекции  $E_{\text{инж}} = 100$  кэВ.

Сравнение тока, измеренного в максимуме спектра, с расчетным показало хорошее (лучше 10%) соответствие. Искажение фазового объема после ускорения в

резонаторе небольшое. Характерно, что при некотором значении фокусного расстояния линзы на люминофоре можно получить теневое изображение анодной сетки электронной пушки.

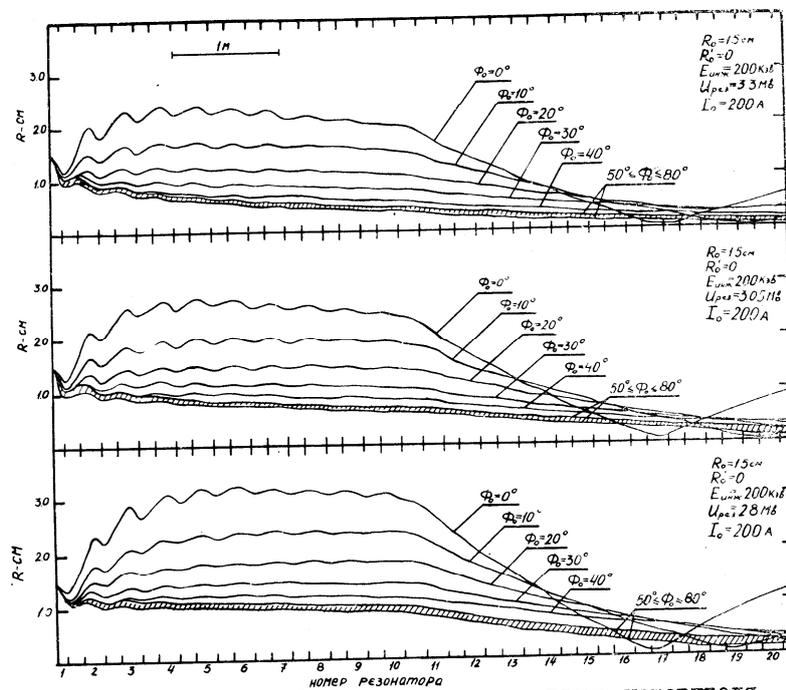


Рис. 41. Траектории крайних электронов по длине ускорителя.

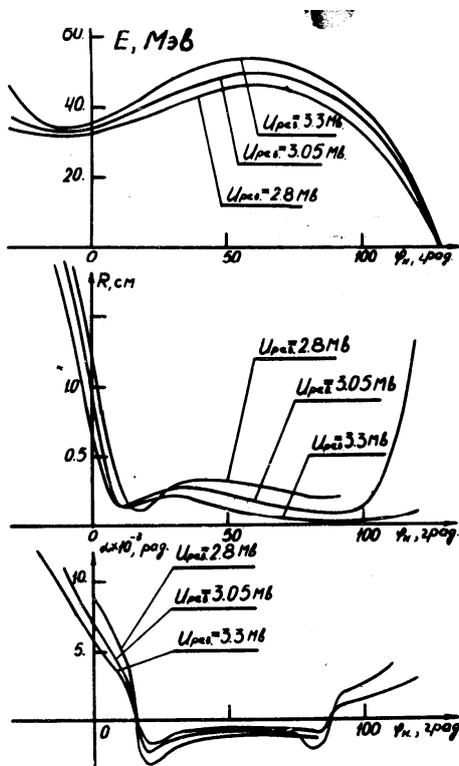


Рис. 42. Параметры пучка в конце линейного ускорителя.

В 1976-77 годах на двух секциях ЛУ (12 резонаторов) электроны были ускорены до энергии 25÷27 МэВ. Использовалась электронная пушка с микропервансом 0.7 в

варианте "внешней инжекции". При инжекции  $I_0 = 60$  А (энергия инжекции 200 кэВ) на выходе ЛУ через диафрагму диаметром 1 см получен ток 10 А. Полный ускоренный ток  $I_{\text{уск.}} = 20$  А, что соответствует расчету. Детального изучения геометрических параметров пучка не производилось.

В 1978 году ЛУ (20 резонаторов) запущен на комплексе ВЭПП4. При энергии пучка ЭЛИТ-3А, возбуждающего гирокон, в 1 кДж (1.6 МэВ, 50 А, 11 мкс) электроны были ускорены в ЛУ до энергии 52÷54 МэВ, т.е. на ускоряющих резонаторах получено напряжение 3.3 МВ, а на инжекционном – в два раза меньше. Использовались варианты и "внешней" и "внутренней" инжекции. При инжектируемом токе  $I_0 = 100\div 110$  А на выходе ускорителя на цилиндре Фарадея диаметром 15 мм получен ток около 17 А при полном токе 35÷40 А.

Изучение геометрических параметров пучка показало, что при выключенной линзе, расположенной между секциями, на выходе ускорителя пучок сильно вытянут по вертикали в отношении большем 5:1. Включение линзы перефокусировало пучок по горизонтали, так что оптимальный по выходу позитронов размер пучка (на люминофоре) имел диаметр  $\sim 5\div 30$  мм, что уменьшало эффективность преобразования пучка электронов в позитроны.

Дальнейшие исследования показали, что причиной асимметрии пучка является искажение электрического поля в резонаторах из-за наличия щелей связи [48]. Изменением взаимного расположения щелей связи в ускоряющих резонаторах удалось практически полностью устранить асимметрию и получать на выходе ЛУ пучок диаметром меньше 1 см. Такой пучок фокусируется на конвертер в десятые доли миллиметра, так что происходит испарение поверхности за один импульс и разрушение конвертера через несколько часов работы за счет тепловых ударов. Выход позитронов при тех же условиях вырос в 1.7 раза.

Для компенсации магнитного поля Земли и других постоянных рассеянных полей, которые могут отклонить пучок в линейном ускорителе, особенно на начальном участке, когда энергия электронов относительно мала, используются 4 группы корректирующих катушек, KG1, KV1, KG2, KV2, для первой и второй секций линака соответственно. Катушки создают вертикальное или горизонтальное поле в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Каждая из групп представляет собой комбинацию из двух катушек длиной около 3.5 м, по 30 витков в каждой. Катушки питаются постоянным током амплитудой до 5 А, величина магнитного поля 0.39 Гс/А для катушек типа KG и 0.33 Гс/А для катушек типа KV. Однородность поля в области  $\pm 25$  мм не хуже  $5\cdot 10^{-3}$ .

Проведенные расчеты, экспериментальные исследования и настройка дали возможность получить на выходе линейного ускорителя электроны с энергией 50 МэВ и током 60 А в импульсе. Это обеспечивает захват и ускорение в синхротроне Б-4  $(2\div 3)\cdot 10^8$  позитронов в импульсе.

Линейный ускоритель работает в составе комплекса ВЭПП4 с 1978 года.

#### 4.4. Конверсионная система

Эмиттанс электронного пучка на выходе ЛУ около  $5\cdot 10^{-4}$  рад·см (радиус 0.5 см, угол  $10^{-3}$  рад). Оптимальная энергия позитронов, захватываемых в синхротроне, 7 МэВ; число захватываемых позитронов при оптимальных условиях и отсутствии потерь  $N^+/N^- = 2\cdot 10^{-7}\cdot E^2$  [26, 49, 50, 51].

Как уже говорилось в разделе 4.3, для обеспечения размера пучка на конвертере в пятно размером  $\sim 1$  мм электроны фокусируются дважды: вначале длиннофокусной линзой в ЛУ для получения минимального размера пучка на выходе ускорителя  $\sim 1$  см), а затем короткофокусной линзой производится фокусировка пучка на конвертере.

Фокусировка электронов на конвертер и соби́рание родившихся позитронов осуществляется продольным магнитным полем.

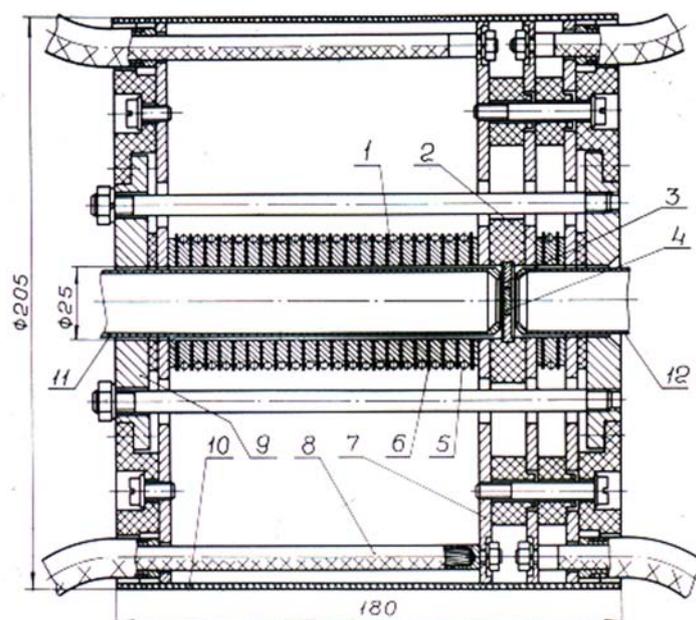


Рис. 43. Конверсионная система.

1 – фокусирующая линза; 2 – собирающая линза; 3 – панель конвертера; 4 – конвертерная планка; 5 – трубка охлаждения; 6 – изолятор; 7 – дисковый вывод; 8 – коаксиальный кабель; 9 – фланец; 10 – экран; 11 и 12 – вакуумные трубки.

Конструктивно блок конверсии (рис. 43) представляет собой две линзы – фокусирующую (1) и собирающую (2), между которыми находится панель (3) с конвертерной планкой (4). Линзы (1) и (2) выполнены в виде катушек типа соленоида Биттера с внутренним диаметром 25 мм и наружным 45 мм. Число витков фокусирующей линзы – 23, собирающей – 3, толщина витков 4 мм. К крайним виткам обеих катушек припаяны дисковые выходы (7), к которым равномерно по окружности подводится ток питания – к фокусирующей линзе в шести точках, а к собирающей – в двенадцати. Подводы осуществляются малоиндуктивными коаксиальными кабелями (8). Внутри линзы (1) расположена трубка (11), соединенная с вакуумной полостью ЛУ; трубка (12), расположенная внутри линзы (2), соединена с вакуумной полостью синхротрона Б-4. Торцы обеих трубок вакуумноплотно закрыты титановой фольгой толщиной 50 микрон, между которыми и перемещается конвертер, находящийся в атмосфере.

Конвертер (рис. 44) представляет собой длинную стальную планку (1) с продольным пазом, в который высокотемпературным вакуумным припоем ВВ702 впаяна вольфрамовая пластина (3) длиной 75 мм и толщиной 3.5 мм (1 радиационная единица). Со стороны входа электронов конвертер закрыт фольгой (2) для защиты выходной фольги ЛУ от осколков вольфрама, вылетающих при локальном выделении в малом объеме энергии фокусируемых на конвертер электронов. После каждого цикла перехода с электронного на позитронный режим планка смещается на 0.3 мм посредством программно-управляемого привода с шаговым двигателем. Эта процедура многократно повторяется в пределах 70 мм (рабочая область конвертера). При работе в электронном режиме конвертер выводится в крайнее положение, и электроны свободно летят через окно (4) в конвертерной планке.

По истечении довольно длительного времени на конвертере образуется канавка, обусловленная разрушением вольфрама пучком электронов при многочисленных циклах инжекции. На рис. 45 показана фотография конвертера со следами разрушения

после нескольких лет эксплуатации. Защитная фольга удалена, внизу виден выкрошившийся вольфрам. Поскольку ось конвертера смещена относительно оси падающего пучка электронов по вертикали на 0.9 мм, перевернув конвертер на 180° относительно оси пучка, можно удвоить его "время жизни".

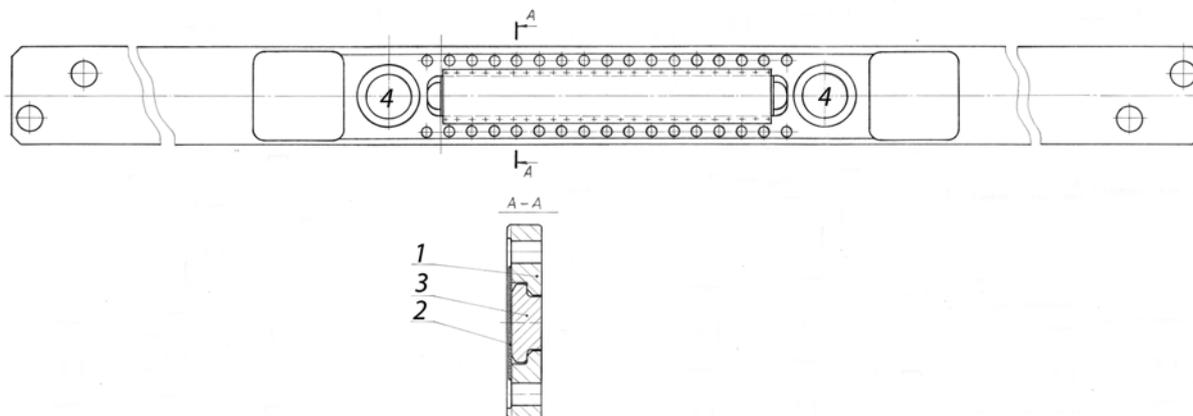


Рис. 44. Конвертерная планка.

1 – корпус; 2 – фольга; 3 – вольфрамовый конвертер; 4 – окна для электронного пучка.

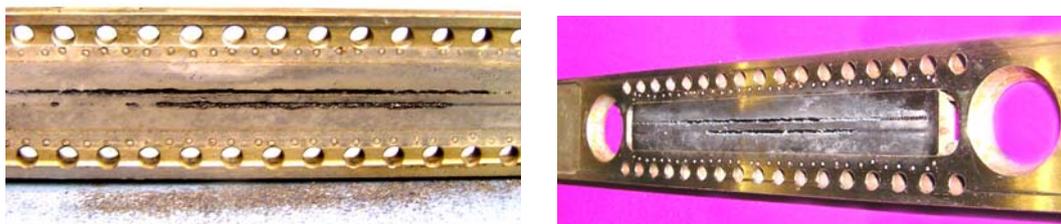


Рис. 45. Конвертер со следами разрушения после нескольких лет эксплуатации (защитная фольга снята).

#### 4.5. Электронно-оптический канал ЛУ – Б4

В синхротроне принята однооборотная инжекция по вертикали с предварительным разложением частиц по энергии [52]. Такой вариант обеспечивает максимальный захват позитронов. С учетом расположения впускной системы (впускной магнит, инфлектор) и искажения медианной поверхности в синхротрон захватывается пучок с эмиттансом, равным  $2.4 \cdot 10^{-2}$  см·рад. Апертура системы транспортировки (СТ) рассчитана на проводку пучка с эмиттансом  $7 \cdot 10^{-2}$  см·рад. Столь большая апертура по вертикали выбрана для того, чтобы избежать потерь частиц по вертикали из-за хроматической aberrации в линзах СТ. Для наилучшего согласования эмиттанса пучка с акцептансом синхротрона пучок на входе должен иметь амплитудные функции  $\beta_x = 145$  см,  $\beta_z = 180$  см и дисперсионные функции  $\psi_x = 170$  см,  $\psi_z = \psi_z' = \psi_x' = 0$ . Последнее условие, с учетом взаимного расположения синхротрона и линейного ускорителя, требует применения ахроматической системы параллельного переноса на величину около 1 м. Это может обеспечить система из двух поворотных магнитов и двух линз между ними. Применяя цилиндрические линзы с продольным полем, фокусирующие в одном направлении, можно максимально упростить СТ, что особенно важно при транспортировке пучка с большим фазовым объемом. Подготовку пучка (разложение по энергии, получение нужной  $\beta_x$ -функции) для транспортировки по ахроматической системе удастся осуществить одним магнитом и двумя квадрупольными линзами с прямоугольной апертурой (линзы Хэнда–Панофского). Таким образом, СТ можно разбить на два участка. Первый (участок разложения пучка по энергии) включает поворотный магнит М1 (90°) и две квадрупольные линзы Л1 и Л2.

Второй участок, не влияя на горизонтальное движение, осуществляет ахроматический перенос пучка. В него входят два магнита М2 и М3 с однородным полем и две цилиндрические линзы Л3 и Л5. Для точного согласования эмиттанса пучка с акцептансом синхротрона в первом магните имеется возможность изменять показатель спада магнитного поля, а во второй части канала предусмотрена цилиндрическая линза Л4, которая расположена в нуле вертикальной  $\psi_z$ -функции.

Схема расположения элементов канала представлена на рис. 46, оптические функции – на рис. 47.

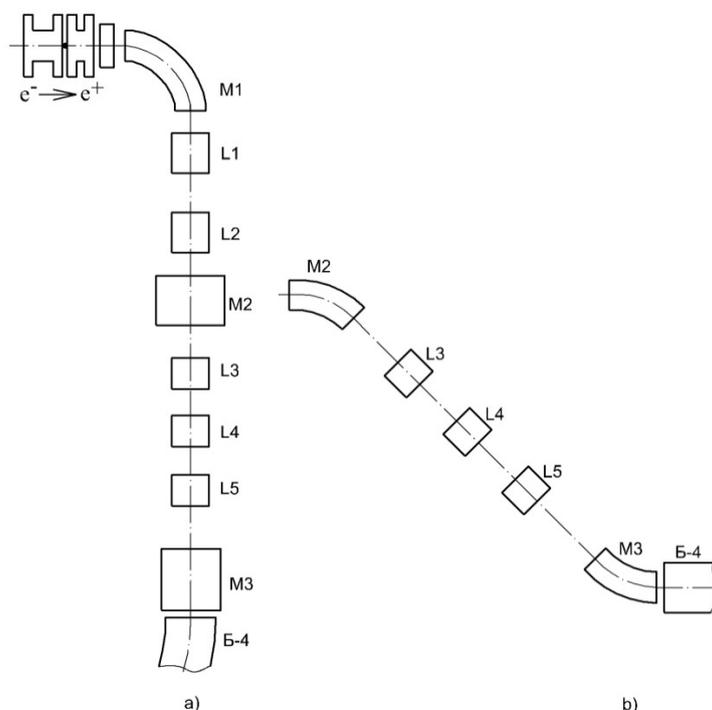


Рис. 46. Схема элементов канала ЛУ – Б4.

а) – вид сверху; б) – участок параллельного переноса, вид сбоку.

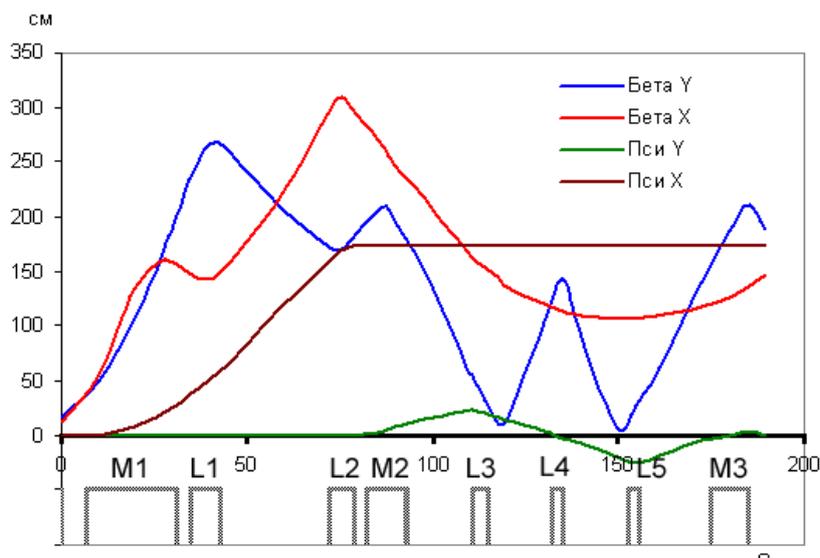


Рис. 47. Оптические функции канала ЛУ – Б4.

"Законные" потери при прохождении позитронного пучка через канал ЛУ-Б4 складываются из коэффициента прохождения энергетического разброса, коэффициента прохождения вертикального фазового объема, коэффициента учета потерь из-за aberrаций в 1 и 2 магнитах, коэффициента прохождения через впускное окно в

магнитопроводе синхротрона, коэффициента прохождения через технологические перегородки в магните МЗ. Результирующий коэффициент прохождения от конвертера до впуска в синхротрон  $K_{\Sigma} \approx 0.1$ .

#### 4.6. Синхротрон Б-4

Конструкция собственно магнита синхротрона не претерпела существенных изменений относительно первоначальной, до 1977 года (см. раздел 2). При переходе к существующей ныне системе получения позитронов изменены лишь отдельные системы, в частности:

- Коммутация обмотки электропитания – см. 4.6.1.
- ВЧ – см. 4.6.2.
- Впуск – см. 4.6.5.
- Выпуск – см. 4.6.6.
- Системы наблюдения за пучком.
- Вакуумная система (поставлены магнитоэрозийные насосы).

##### Основные параметры Б4

Энергия инжекции, МэВ	7
Энергия выпуска, МэВ	350
Радиус равновесной орбиты, см	102
Апертура (высота × ширина), см <sup>2</sup>	9 × 14
Часть апертуры по Z, свободная для ускорения пучка, см	5.3
Апертурные функции ( $\beta_x / \beta_z$ ), см	145 / 180
Частоты бетатронных колебаний ( $\nu_x / \nu_z$ )	0.87 / 0.71
Длительность импульса ускорения, мс	3.5
Амплитуда тока в обмотке питания, кА	85
Гармоника ВЧ ускорения	1
Частота ВЧ, МГц	37.5
Длительность импульса тока, нс	27
Амплитуда захваченного тока пучка на инжекции ( $e^- / e^+$ ), мА	150 / 1.5

Однооборотная инжекция осуществляется по вертикали с захватом большого фазового объема. Впуск производится через наклонный канал в железе магнитопровода и впускной магнит МЗ, расположенный в прямолинейном промежутке.

##### 4.6.1. Система питания Б-4

Квазипостоянное магнитное поле инжекции формируется током от отдельного генератора (рис. 48).

Синусоидальные импульсы тока стабилизированы; помимо стабилизации тока от импульса к импульсу в схеме предусмотрена медленная стабилизация, предотвращающая изменения тока из-за температурных нестабильностей элементов.

После окончания инжекции пучок ускоряется в бетатронном режиме до энергии 13 МэВ.

Ускоряющая вихревая ЭДС создается бетатронным сердечником, охватывающим один из квадрантов электромагнита (рис. 49). Точное согласование ускоряющего напряжения с напряжением на шинах электромагнита обеспечивается благодаря параллельному включению обмотки сердечника с магнитом и питанию их от общего генератора. Последовательно с магнитом включается дополнительная индуктивность  $L_{\text{доп}}$ , с помощью которой подстраивается положение радиуса стягивания пучка в процессе бетатронного ускорения. После того, как ток в обмотке бетатронного сердечника достигает максимума, она закорачивается посредством отдельного вентиля,

благодаря чему ток в обмотке спадает за длительное время (1 мс) и напряжение обратного знака, тормозящее электроны, оказывается пренебрежимо малым.

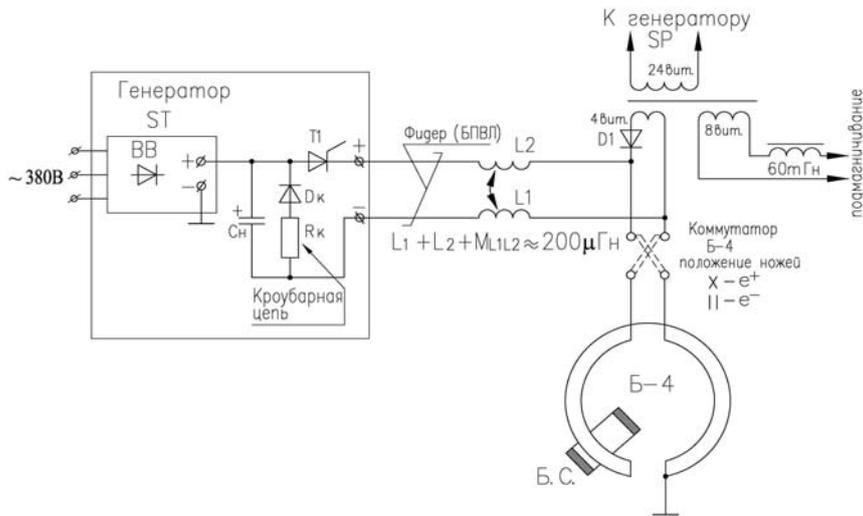


Рис. 48. Принципиальная схема генератора магнитного поля инжекции.

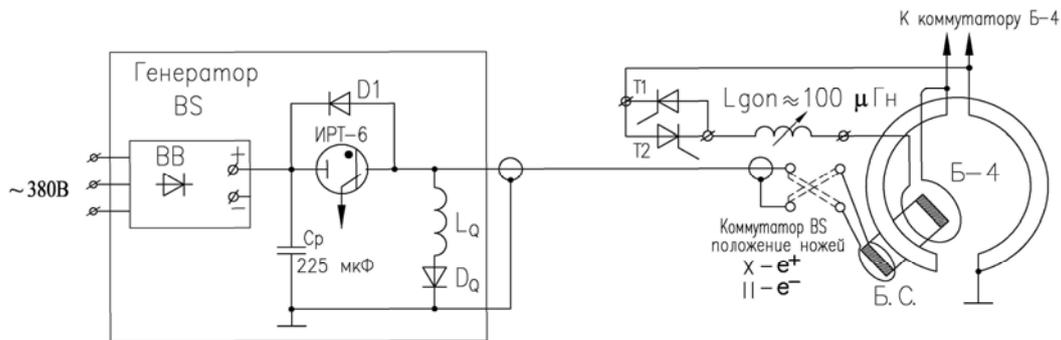


Рис. 49. Принципиальная схема генератора поля бетатронного ускорения.

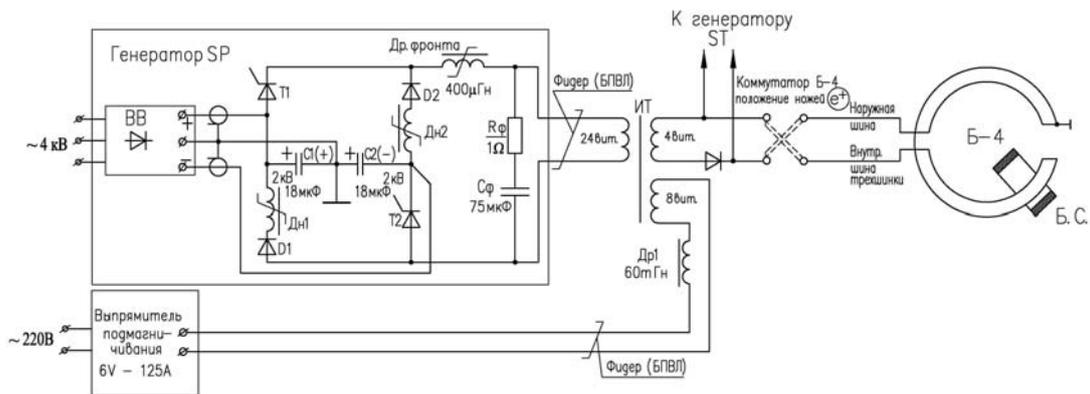


Рис. 50. Принципиальная схема генератора основного магнитного поля ускорения.

Для более полного использования железа бетатронного сердечника он подмагничивается импульсным полем, длительность которого формируется индуктивностью  $L_Q$ , включенной параллельно индуктивности первичной обмотки бетатронного сердечника.

В момент инжекции включается один из тиристорных ключей  $T_1$  либо  $T_2$  в соответствии с положением коммутатора BS (в зависимости от режима, электроны/позитроны).

В конце бетатронного ускорения включается основное поле (рис. 50) и ВЧ генератор. Для получения ведущего поля при конечной энергии электронов 350 МэВ, с учётом насыщения железа электромагнита требуется ток около 85 кА.

Коэффициент трансформации импульсного трансформатора ИТ выбран  $K_{тр} = 6:1$  с целью максимально увеличить ресурс основной батареи конденсаторов С1-С2 за счет понижения рабочего напряжения при увеличении длительности импульса ускорения.

Коммутация квадрантов в прямолинейных промежутках переделана так, что заземлена средняя точка. Это позволило понизить вдвое максимальное напряжение (+ / -) на входе обмотки.

Изменение направления тока в шинах Б4 обеспечивается механическим коммутатором во вторичной обмотке импульсного трансформатора (рис. 51).



*Рис. 51. Механический коммутатор главного поля Б4.*

Высокая стабильность максимального поля,  $\sim 10^{-4}$ , позволяет делать выпуск с привязкой по времени. Стабильность обеспечивается применением схемы прецизионной откачки заряда с основной конденсаторной батареей.

#### **4.6.2. ВЧ генератор**

До 1986 года ускорение в Б4 происходило на второй гармонике частоты обращения. Это приводило к дополнительным потерям при захвате в ВЭППЗ, поскольку фронт импульса дефлектора имеет ненулевую длительность, а при естественной нестабильности времени запуска дефлектора Б4 в ВЭППе могут оказаться от одного до трех (!) сгустков, разнесенных по фазе ВЧ ВЭППЗ.

С 1986 г. на Б4 работает ВЧ генератор на первой гармонике частоты обращения [53]. Работа на первой гармонике позволяет уменьшить потери на выпуске и захвате в ВЭППЗ.

Ускоряющая система выполнена в виде четырех частотно-перестраиваемых резонаторов, автоматически настраиваемых на рабочую частоту 37.5 МГц. Каждый резонатор представляет собой коаксиальную короткозамкнутую линию длиной меньше  $\lambda/4$  ( $\lambda$  – длина волны), заполненную ферритами. Перестройка по частоте осуществляется подмагничиванием ферритов в электромагните. Конструктивная схема ускоряющей системы показана на рис. 52.

Ускоряющая система состоит из четырёх резонансных секций, соединенных в две группы. Каждая секция (1) заполнена ферритовыми кольцами (2) с размерами  $250 \times 180 \times 16$  мм<sup>3</sup>. Высота набора колец 32 мм. Ферриты 60НН; подмагничивание ферритов для частотной перестройки осуществляется электромагнитом (3), (4). Направление подмагничивающего поля указано стрелками. Подмагничивающее поле проникает в ферриты через прорези, предусмотренные в каждой секции.

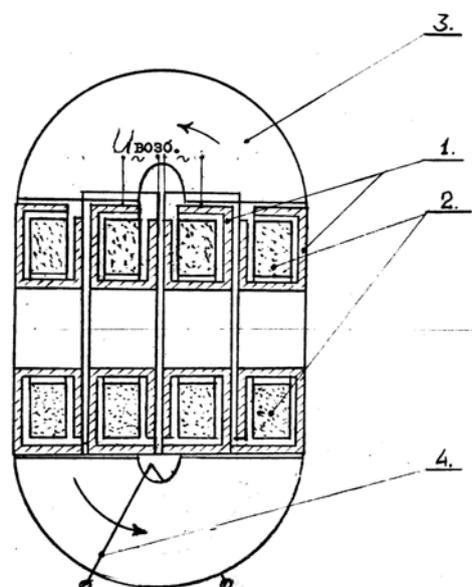


Рис. 52. Конструктивная схема ускоряющей системы Б-4.

1 – резонансные секции; 2 – ферриты; 3 – магнитопровод электромагнита; 4 – обмотка электромагнита.

Рассеиваемая в ферритах мощность отводится на охлаждаемый водой корпус через тонкий слой теплопроводного клея "Эластосил" марки 137–182, которым ферритовые кольца приклеены к корпусу.

Характеристики ускоряющей системы Б-4 приведены в таблице 4.1.

**Таблица 4.1. Основные характеристики ускоряющей системы Б-4**

Рабочая частота	МГц	37.5
Ускоряющее напряжение	кВ	22 – 23
Импульсная мощность	кВт	60
Средняя мощность, рассеиваемая в резонансной секции при частоте повторения 1 Гц	Вт	75

Общий вид ВЧ генератора и резонатора Б4 перед установкой в синхротрон показан на рис. 53.



Рис. 53. Общий вид ускоряющей системы и питающего усилителя ВЧ мощности перед постановкой в синхротрон.

### 4.6.3. Впуск

Через один квадрант, в следующем за впускным, прямолинейном промежутке Б4 расположен инфлектор [54].

Инфлектор Б-4 (рис. 54) осуществляет удар по пучку только электрическим полем. Он выполнен в виде двух пластин. Верхняя (3) состоит из двух половинок с зазором (4) между ними для того, чтобы обеспечить возможность для прохождения выпускаемого пучка (см.ниже). Они соединены между собой перемычками (2). Питание пластин осуществляется через вводы (1).

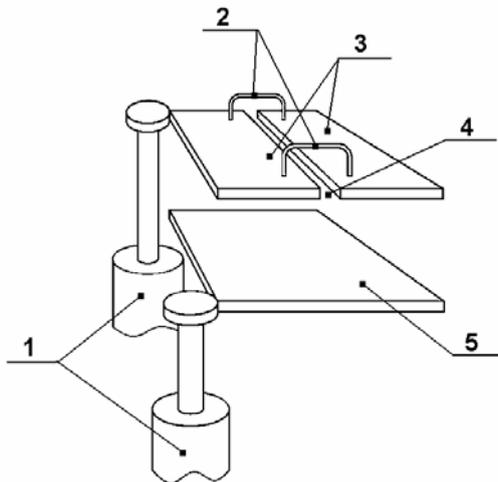


Рис. 54. Упрощенный чертеж инфлектора Б-4.

Импульсы, пришедшие по кабелям от генератора, поглощаются согласующими нагрузками сопротивлением по 50 Ом (не показаны), в результате чего остается только электрическая составляющая импульсов, которая поступает через эти вводы на пластины. Первоначально использовались обе пластины, но затем было принято решение отказаться от использования верхней, поскольку ее паразитные параметры сильно искажали и затягивали форму импульса. В настоящий момент она заземлена, и используется только нижняя пластина. Для компенсации ослабления удара зарядное напряжение генератора было увеличено в два раза. Несмотря на то, что при подаче потенциала только на одну пластину поле имеет худшую однородность по сравнению с двухполярным питанием, после отключения верхней пластины захват в Б-4 существенно улучшился в связи с лучшей результирующей формой импульса поля между пластинами.

### 4.6.4. Выпуск

Выпуск из Б4 производится со среднего радиуса по вертикали, через выпускной магнит РМ1 и наклонный канал в железе магнитопровода. В силу специфики расположения "Позитрона" в зале накопителя ВЭППЗ, дефлектор расположен в одном промежутке с инфлектором и выпускным магнитом, под носиком выпускного магнита. Пучок после удара дефлектора совершает один оборот, прежде чем попадает в выпускной магнит.

Дефлектор Б-4 [54] (рис. 55) представляет собой короткозамкнутую петлю. Такая конструкция необходима для удара по пучку магнитным полем. Путь протекания тока выглядит следующим образом: от кабельного ввода (для упрощения не показан), подсоединенного к вводу контакту (1), ток по верхней шине (2) переходит к нижним шинам (3), а по ним – к заземленному контакту (4).

Такая нагрузка имеет индуктивный характер, и вызывает нежелательные отражения, поэтому в генераторе есть второй разрядник, работающий без дополнительного запуска. На его центральный электрод подается напряжение  $U/3$ , но

оно остается к приходу отраженного импульса, который имеет отрицательную полярность, и за счет увеличения разности потенциалов происходит пробой промежутков. Ввиду задержки пробоя на несколько наносекунд часть импульса отражается обратно и поглощается полностью только при повторном возвращении от нагрузки, поскольку второй разрядник остается в проводящем состоянии.

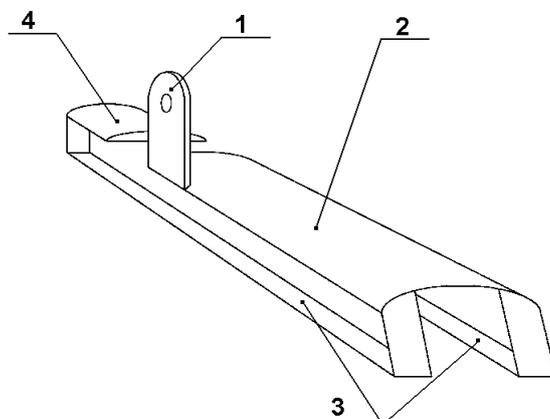


Рис. 55. Упрощенный чертеж дефлектора Б-4.

#### 4.6.5. Коррекция орбиты

Часть апертуры Б4 по вертикали занята впускным, выпускным магнитами, инфлектором и дефлектором, поэтому для лучшего использования оставшейся апертуры производится искажение медианной поверхности при инжекции и перед выпуском. Это осуществляется двумя группами магнитов, расположенными в двух соседних прямолинейных промежутках и питающимися от независимых генераторов. Схема расположения элементов впуска и выпуска приведена на рис. 56 и 57. К сожалению, в существующей геометрии Б4 невозможно оптимально разместить корректирующие Z-магниты, поэтому потеря вертикальной апертуры при инжекции составляет около 12%.

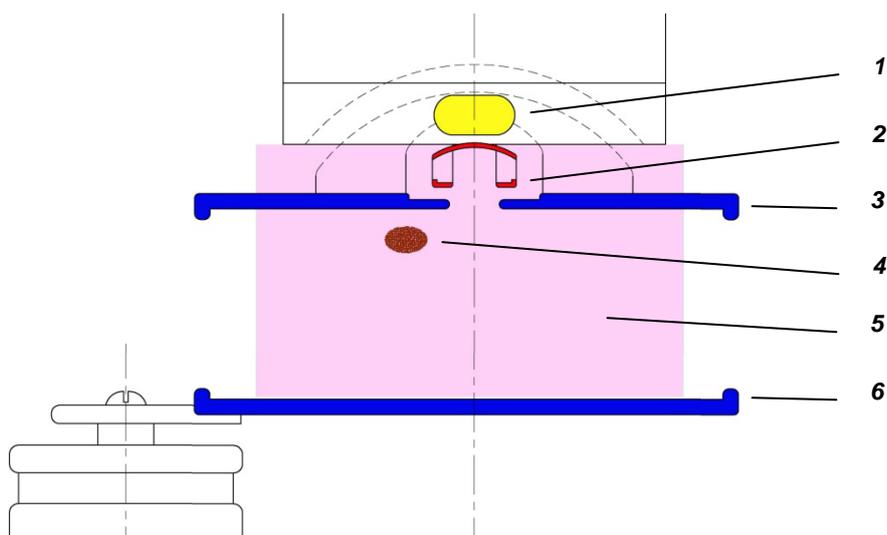


Рис. 56. Схема расположения элементов выпускного промежутка Б-4. Вид по ходу пучка. 1 – окно выпускного магнита; 2 – дефлектор; 3 – верхняя пластина инфлектора; 4 – орбита пучка перед искажением для заведения в дефлектор; 5 – апертура вакуумной камеры Б-4; 6 – нижняя пластина инфлектора.

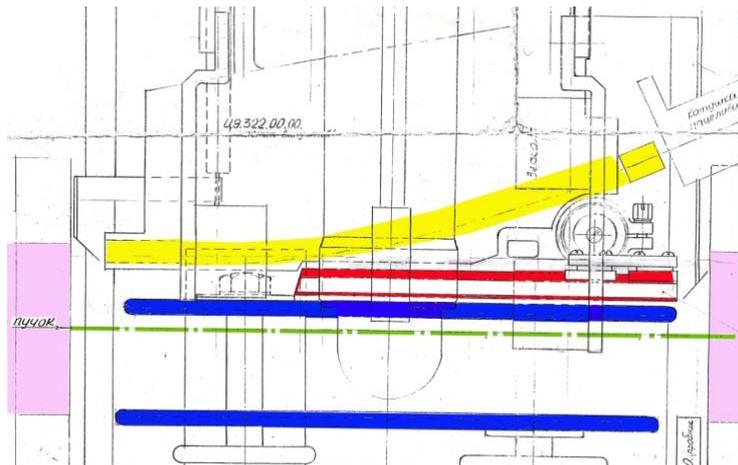


Рис. 57. Схема выпускного промежутка Б-4. Вид сбоку.

#### 4.6.6. Пробники Б-4

Для измерения положения и тока пучка на входе и выходе впускного магнита МЗ расположены пробники, представляющие собой двухслойную комбинацию толстых медных пластин толщиной 6 мм и, со стороны пучка, графитовых пластин толщиной 4 мм (ЦФ2 и DL3). Схема расположения пробников Б-4 приведена на рис. 58. Для измерения орбиты и распределения пучка в камере Б-4 в начальный период после захвата в трёх прямолинейных промежутках расположены пробники в виде длинных узких медных полос поперечным размером 4×2 мм, которые могут двигаться по вертикали и горизонтали по всей апертуре (8, 11, 12, 14, 15, 17).

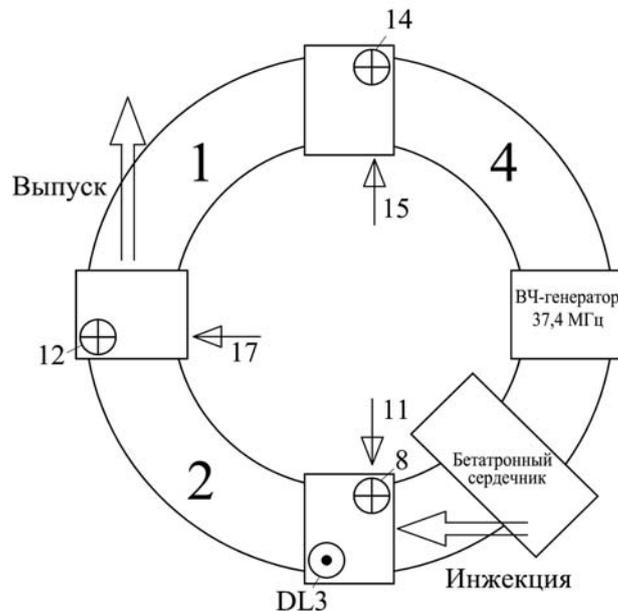


Рис. 58. Схема расположения пробников Б-4.

#### 4.6.7. Датчик тока пучка Б4 (пояс Роговского)

Для измерения амплитуды тока в процессе ускорения используется магнитоиндукционный датчик [55] на основе пояса Роговского. Пояс расположен в одном из прямолинейных промежутков Б4. Основные особенности его работы: необходимость измерения малых токов (до 100 мкА) и работа в условиях больших электромагнитных наводок, поскольку он находится в области больших рассеянных полей от ведущего магнитного поля синхротрона и, кроме того, вплотную к нему расположены два магнита сильноточной Z-коррекции орбиты пучка на впуске и выпуске.

Минимальной восприимчивостью к полю помех, а также к смещению пучка обладает датчик с азимутально-симметричной обмоткой и с однородным по азимуту магнитным сердечником. В данном датчике обмотка имеет 100 витков, уложенных в равномерно распределенные по окружности кольцевого каркаса пазы. Внутри каркаса с сечением П-образной формы вклеен магнитный сердечник из стали ХВП, однородность которого обеспечивается навивкой его из ленты толщиной 80 мкм. Сечение сердечника 10×20 мм. Датчик помещен в специальный экран. Наиболее эффективным экраном для защиты от импульсных полей является экран из проводящего материала, где ослабление поля происходит за счет наведённых токов, текущих в скин-слое. Экран имеет азимутальную щель, благодаря которой вихревое поле пучка проникает к датчику без ослабления. Поле помехи ослабляется за счет проводящих стенок и глубокой щели. Экран, показанный на рис. 59, состоит из 6 медных чашек с крышками, щель в поперечном сечении имеет вид улитки. При соединении деталей экрана важно обеспечить отсутствие азимутальных щелей в местах контакта, что достигается применением индиевых прокладок, которые раздавливаются при стягивании винтами крышек чашкой. Выводы обмотки датчика проходят сквозь сквозное радиальное отверстие в стенках чашек. Для устранения наводки на выводы они выполнены в виде перевитой пары проводов.

Сигнал с датчика интегрируется электронным интегратором, усиливается и по двухпроводному кабелю передается на приёмный дифференциальный усилитель в пульттовую. Полученный сигнал в каждом цикле измеряется аналого-цифровым преобразователем. Величины токов пучков, вводимого в синхротрон и выводимого из него, выводятся на дисплей из ЭВМ, где из измеренного сигнала вычитается сигнал помехи, **записанный в рабочем режиме, но без пучка.**

Применение описанных мер по уменьшению влияния помех позволило измерять малые, до 100 мкА, токи пучка в синхротроне.

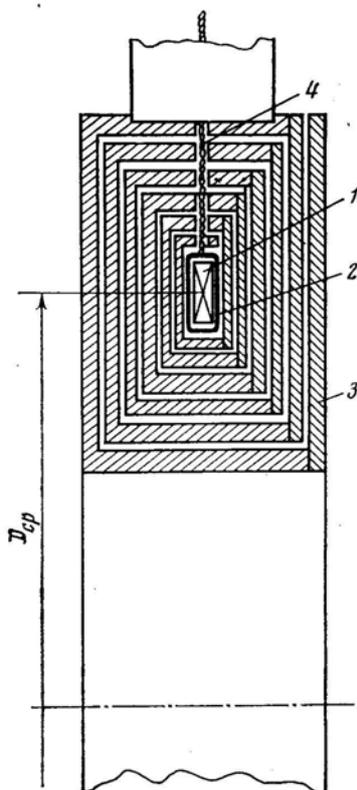


Рис. 59. Конструкция экрана датчика.

1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – экран; 4 – вывод обмотки.  $D_{cp}$  – средний диаметр сердечника (260 мм).

## 5. Модернизация инжектора "Позитрон"

Эффективность работы комплекса ВЭПП4 в режиме экспериментов по физике высоких энергий в большой степени определяется скоростью накопления позитронов в бустерном накопителе ВЭПП3. Для повышения скорости инжекции позитронов на установке "Позитрон" отлажен режим работы с частотой 1.5 Гц. С этой целью проведен ряд подготовительных работ:

- модернизированы зарядные цепи мощных импульсных генераторов, питающих магнитные элементы синхротрона Б4 и каналов транспортировки пучков, а также всех импульсных генераторов, питающих слаботочные корректирующие магниты;
- сконструирована и реализована система дополнительного охлаждения коммутатора Б4;
- разработаны и изготовлены запасные блоки управления коммутацией Б4;
- исследован тепловой режим нагрузок установки и осуществлён длительный прогон всех источников импульсного питания установки "Позитрон".

Дальнейшее повышение частоты повторения связано с практически полной переделкой всех источников питания. Кроме того, неминуемо возникают проблемы с захватом в ВЭПП3 в связи с тем, что пучок не успевает затухнуть между предыдущим и последующим импульсами инжекции. Технически предел повышения частоты повторения Позитрона – 4 Гц – ограничен нагревом проволочных перемычек второй отклоняющей системы гирокон, которые охлаждаются только за счет излучения.

На комплексе достигнута средняя скорость накопления позитронов в бустерный накопитель ВЭПП3 до 65 мкА/с. На рис. 60 приведен график тока пучка ВЭПП3 в зависимости от времени. Как видно, для накопления пучка позитронов с током 50 мА в двух сгустках требуется около 15 минут.

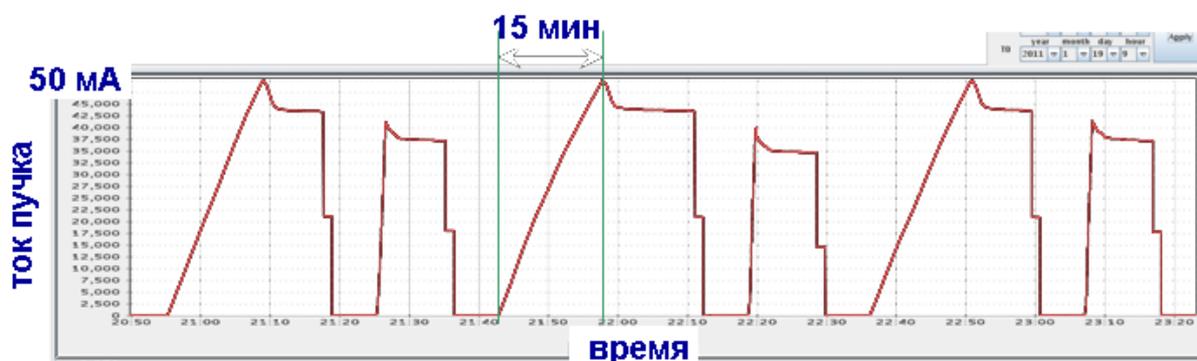


Рис. 60. Ток пучка ВЭПП3 в зависимости от времени.

Заметный вклад в повышение надёжности установки внесло установление многоячеистого катода пушки источника электронов ЭЛИТ-3А и понижение накала пушек ЭЛИТ-3А и линейного ускорителя ЛУ программным образом в режимах без накопления пучка в ВЭПП3. В результате:

- ЭЛИТ-3А работает уже более двух лет без необходимости вскрытия;
- число пробоев при работе установки в режиме 900 Дж снизилось примерно в 50 раз;
- установлен рекорд по электрической прочности ускорителя ЭЛИТ-3А: 1 пробой на 3 000 000 импульсов.

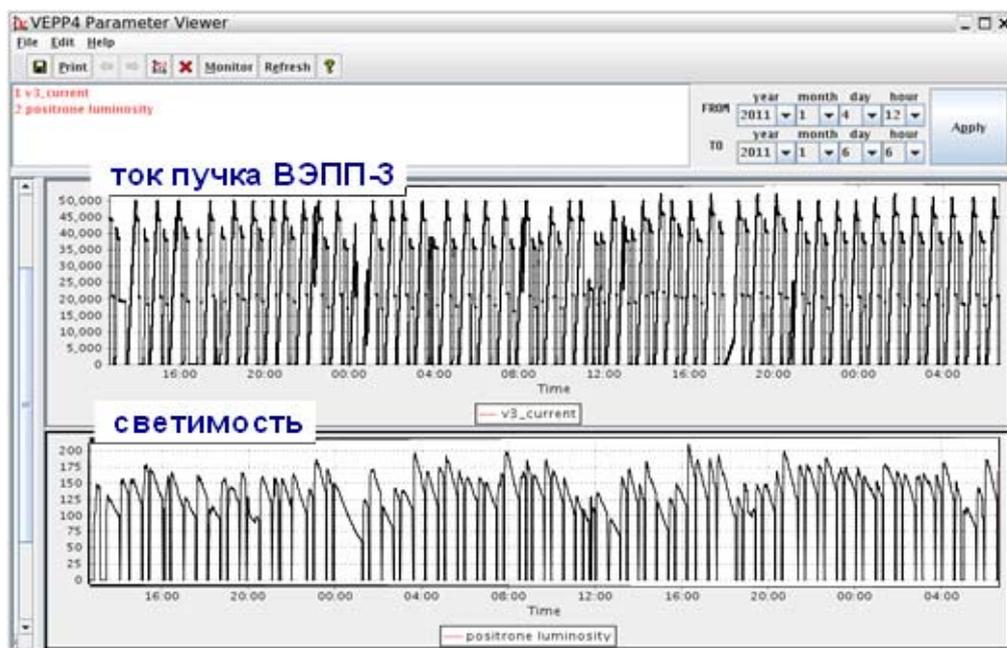


Рис. 61. Токи пучков ВЭПП3 и ВЭПП4М в режиме эксперимента.

Рис. 61 иллюстрирует работу комплекса в режиме эксперимента по физике высоких энергий, на верхнем графике изображена зависимость тока пучка ВЭПП3 от времени, на нижнем графике – измеренная светимость электрон-позитронного коллайдера ВЭПП4М. Видно, что надежная работа инжектора "Позитрон" и бустерного накопителя ВЭПП3 позволяет достигать светимости выше  $150 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на энергии ВЭПП4М 1.8 ГэВ в долговременном режиме.

Работы по повышению надежности установки продолжают. Принимаются меры по улучшению принудительного охлаждения сильноточных импульсных генераторов, питающих мощный источник электронов ЭЛИТ-3А, магниты синхротрона Б4 и канала транспортировки пучков, а также тиристорного отсека системы питания синхротрона Б4. Модернизируется кондиционирование помещения импульсного питания установки "Позитрон" и система управления запусками слаботочных источников импульсного питания (выключение в режимах работы комплекса без накопления пучка в ВЭПП3).

## Заключение

В заключение, в таблице 5.1 приведены основные особенности позитронного инжектора до и после 1977 года.

**Таблица 5.1. Основные отличия ПОЗИТРОНА до и после 1977 года**

	До 1977 года	После 1977 года
Инжекция	многооборотная	однооборотная
Инжектор	ЭЛИТ-3 – 2 МэВ, 3 А, 1.5 мкс	* ЭЛИТ-3А – 1.6 МэВ, 50 А, 11 мкс * Гирокон – 430 МГц, 65 МВт * Линак – 40 МэВ, 30 А, 30 нс
Впуск	Многооборотный, по радиусу снаружи	Однооборотный, по вертикали, в центре
Инфлектор	Сердечник накопления, по радиусу	Однооборотный, по вертикали
Питание главного поля	Полное напряжение, коэффициент трансформации = 4	Симметричное напряжение (+ / -), в 2 раза меньше, коэффициент трансформации = 6
ВЧ	"Корунд", 2-я гармоника	"Авербух", 1-я гармоника
Выпуск	На наружном радиусе, по вертикали	В центре, по вертикали,
	С выключением ВЧ	Без выключения ВЧ, сквозь щель в инфлекторе и дефлекторе
Дефлектор	На наружном радиусе, почти в медианной плоскости, за ¼ оборота до выпуска	Вверху вакуумной камеры, в выпускном промежутке, удар за 1 оборот до выпуска
Конверсия	$430^-/250^+$ , в канале Б4-ВЭППЗ	$40^-/7^+$ , в канале ЛУ-Б4
Частота повторения	1 Гц	1.5 Гц
Скорость накопления позитронов в ВЭППЗ	0.75 мкА/имп. ( $\sim 1.2 \cdot 10^6 e^+$ /имп.)	65 мкА/с ( $\sim 10^8 e^+$ /с)

## Литература

- [1] А.Н. Алешаев и др. Ускорительный комплекс ВЭПП4, Препринт ИЯФ 2011-020, Новосибирск, 2011
- [2] В.И Бобрик, В.В.Петров, Г.И.Яснoв. Инжекция электронов в синхротрон Б-4. // Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 9-16 октября 1968, т.1, с.500. Москва, ВИНТИ, 1970.
- [3] Г.И. Будкер, и др. Работы по сильноточным ускорителям Института ядерной физики // Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. Атомиздат, 1964, с.1071-1072.
- [4] Г.И. Будкер и др. Запуск синхротрона Б-3М – инжектора для позитрон-электронного накопителя. // Атомная энергия, 1966, т.20.
- [5] Ю.А. Гриц и др. Импульсные сильноточные ВЧ-ускорители для однооборотной инжекции в синхротрон. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963 г. М., Атомиздат, 1964, стр. 1080-1084.
- [6] И.Г.Макаров и др. Запуск импульсного линейного ускорителя с энергией 3.5 МэВ – инжектора для однооборотной инжекции в синхротрон Б-3М. //Препринт ИЯФ 1968-177, 1968.
- [7] В.Г. Давидовский и др. Опыты по однооборотному захвату в синхротрон Б-3М. //

- Электронные ускорители, сборник, Атомиздат, 1966.
- [8] Е.А. Абрамян и др. Импульсный ускоритель электронов на энергию 3 МэВ. Сб.Электронные ускорители, вып.3, с.36-38. Атомиздат, 1970.
  - [9] В.Ф.Клюев. Работа по запуску ЭЛИТ-3 – инжектора синхротрона Б-4. Дипломная работа, ИЯФ, 1968.
  - [10] Г.И. Яснов. Высоковольтные инжекторы сильноточных импульсных синхротронов. Кандидатская диссертация, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1973.
  - [11] В.В. Петров. Сильноточный синхротрон Б-3М – инжектор для позитрон-электронного накопителя ВЭПП-2. Кандидатская диссертация, ИЯФ СО АН СССР, 1969.
  - [12] А.А. Лившиц. Электронный синхротрон на энергию 500 МэВ. Кандидатская диссертация, ИЯФ СО АН СССР, 1970.
  - [13] В.Ф. Клюев и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.II, с.101, Дубна, 1981,
  - [14] И.И. Авербух и др. Синхротрон Б-4 – инжектор для позитрон-электронного накопителя ВЭППЗ, Препринт ИЯФ 1971-021, Новосибирск, 1971.
  - [15] А.Д. Букин. Элементы спирального накопления синхротрона Б-4. Дипломная работа, НГУ, 1969.
  - [16] Т.А. Всеволожская и др. Инжекция позитронов в накопитель ВЭППЗ. Препринт ИЯФ76-94, Новосибирск, 1976.
  - [17] Б.Ф. Баянов, Г.И. Сильвестров. Возможность применения лития для создания цилиндрических линз с большими магнитными полями. Препринт ИЯФ 76-41, Новосибирск, 1976 г.
  - [18] ВЭПП4. Рабочие материалы, январь 1973г.
  - [19] ВЭПП4. Рабочие материалы, выпуск 2, июль 1974г.
  - [20] Будкер Г.И. Авт. свид. №340345 с приоритетом 24.06.1969г., Бюлл. Изобретений №29, 1976, с.221.
  - [21] Budker G.I. et al. The gyrocon – an efficient relativistic high-power VHF generator. Particle Accelerators, 1979, vol.10, pp.41-59.
  - [22] Ф.М. Израйлев и др. Расчет оптимального позитронного конвертера методом Монте-Карло, 1. Описание программ счета. Препринт ИЯФ 73-63, Новосибирск, 1973г.
  - [23] В.А. Таюрский, Б.В. Чириков и др. Расчет оптимального позитронного конвертера методом Монте-Карло. 2. Конвертер в форме пластины. Препринт ИЯФ 72-64, Новосибирск, 1972г.
  - [24] В.А. Таюрский, Б.В. Чириков и др. Расчет оптимального позитронного конвертера методом Монте-Карло. 3. Цилиндрический конвертер. Препринт ИЯФ 73-62, Новосибирск, 1973г.
  - [25] В.А. Таюрский, Б.В. Чириков. Расчет оптимального позитронного конвертера методом Монте-Карло, 4. Конверсия при низкой энергии. Препринт ИЯФ 73-73, Новосибирск, 1973г.
  - [26] В.А. Таюрский. Расчет эффективности конверсии электронов в позитроны при энергии 20-70 МэВ. Препринт ИЯФ 75-39, Новосибирск, 1975г.
  - [27] Г.И. Будкер и др. Патент США N 3885193, 1975.
  - [28] С.Б. Вассерман и др. Запуск позитрон-электронного источника для ВЭПП4. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978, т.1, с.128-131., Дубна, 1979.

- [29] С.Б. Вассерман. Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. Препринт ИЯФ 77-110, Новосибирск, 1977г.
- [30] С.Б. Вассерман и др. Высоковольтный импульсный генератор электронного пучка ЭЛИТ-3А. Препринт ИЯФ 79-111, Новосибирск, 1979г.
- [31] С.Б. Вассерман и др. Высоковольтный емкостной импульсный накопитель энергии. Препринт ИЯФ 80-219, Новосибирск, 1980г.
- [32] 4.6. С.Б. Вассерман и др. Ускорительная трубка генератора электронного пучка ЭЛИТ-3А. Препринт ИЯФ 83-111, Новосибирск, 1983г.
- [33] С.Б. Вассерман и др. Оптика ускорительной трубки генератора электронного пучка ЭЛИТ-3А. Препринт ИЯФ 85-28, Новосибирск, 1985г.
- [34] G.I. Kuznetsov et al. Multy-beam electron gun for ELIT-3A // XIX Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC-2004), October 4-9, 2004, Dubna, Russia.
- [35] G.I. Kuznetsov. High temperature cathodes for high current density. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 340, 1994, pp204-208.
- [36] М.М. Карлинер и др. Круговая развертка пучка электронов в гироконе. Препринт ИЯФ 82-147, Новосибирск, 1982.
- [37] М.М. Карлинер и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭПП4. Система высокочастотного питания. Препринт ИЯФ 84-110, Новосибирск, 1984.
- [38] И.Г. Макаров, Б.З. Персов. О переходном сопротивлении разъемных контактов с индиевой прокладкой на высокой частоте. Препринт ИЯФ 79-15, Новосибирск, 1975.
- [39] В.Г. Вещеревич и др. Резонансная структура линейного ускорителя электронов на стоячей волне. - Вопросы атомной науки и техники. Серия: линейные ускорители, вып. 2(5), с.17, Харьков, 1977.
- [40] М.М. Карлинер и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭПП4. Динамика пучка. Препринт ИЯФ 82-18, Новосибирск, 1982.
- [41] В.Г. Вещеревич и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭПП4. Ускоряющая структура. Препринт ИЯФ 83-140, Новосибирск, 1983.
- [42] Б.И. Гришанов и др. Система инжекции линейного ускорителя позитронного источника ВЭПП4. Вопросы атомной науки и техники, серия: Техника физического эксперимента, 1984, вып. 1(18), с. 10-12.
- [43] С.И. Молоковский, А.Д.Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. Энергия, 1972.
- [44] А.А. Авдиенко и др. Мощный 300 кВ генератор наносекундных импульсов, Препринт ИЯФ 75-85, Новосибирск, 1975.
- [45] Рожков С.Е., Култашев О.Д., Гугнин А.А. Технические характеристики термоэммиттеров на основе сплавов иридия с лантаном, церием, празеодимом. - Электронная техника, Сер. 16, Генераторные, модуляторные и рентгеновские приборы, 1968, № 2, с.81.
- [46] М.М. Карлинер и др. Программа MASON для расчета динамики интенсивного пучка заряженных частиц в переменном электромагнитном поле, Препринт ИЯФ 1980-165, Новосибирск, 1980.
- [47] М.М. Карлинер и др. LANS-программа для вычисления электромагнитных полей и собственных частот аксиально-симметричных резонаторов, Препринт ИЯФ 1979-059, Новосибирск, 1979.
- [48] М.М. Карлинер и др. Влияние электромагнитных полей отверстий связи резонаторов на движение частиц в линейном ускорителе электронов. Доклад на Всесоюзном совещании по линейным ускорителям, Харьков, 1981] Вопросы

- атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, вып.1(7), с.16, Харьков, 1981.
- [49] А.В. Кожемякин и др. Позитронный инжектор, часть 1. Схема получения позитронов, конструкция. Труды VII Межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, 1968. Электронные ускорители, в.1.Атомиздат 1970.
- [50] А.В. Кожемякин, В.В. Петров, Г.И. Яснов. Позитронный, инжектор, часть II. Расчет конверсии. Эксперименты. Там же.
- [51] В.А. Дзюба и др. Позитронный источник комплекса ВЭПП4. Система конверсии. Отчет ИЯФ №853, Новосибирск, 1986.
- [52] В.В. Вольский и др. Позитронный источник комплекса ВЭПП4. Система транспортировки пучка в синхротрон Б-4. Отчет ИЯФ №865, Новосибирск, 1986.
- [53] И.И. Авербух и др. Ускоряющая система синхротрона Б-4, Препринт ИЯФ 2011-007, Новосибирск, 2011.
- [54] О.В. Анчугов. Высоковольтные устройства для управления пучками в ускорителях заряженных частиц. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск-2009.
- [55] А.С. Калинин, Е.И. Шубин. Магнитоиндукционный датчик тока пучка с защитой от магнитных помех. // ПТЭ, 1982, №5, с.32-35.

В.В. Нейфельд, В.В. Петров

ИНЖЕКТОР "ПОЗИТРОН" ДЛЯ ВЭПП4,  
ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ

ИЯФ 2015-15

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 25.10. 2015 г.

---

Сдано в набор 28.10. 2015 г.

Подписано в печать 5..10. 2015 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0,7 печ.л., Обуч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 15

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11