

ИНЖЕКТОР «ПОЗИТРОН» ДЛЯ ВЭПП-4

В. В. Нейфельд¹, В. В. Петров

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В статье описывается опыт более чем 40-летней успешной эксплуатации инжектора позитронов ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4М и его поэтапной модернизации, позволившей улучшить выходные параметры более чем на два порядка. Это позволило на комплексе ВЭПП-4М провести уникальные физические эксперименты по измерению масс элементарных частиц с высокой точностью.

In this report we describe more than forty years' operational experience of the e^+e^- storage ring VEPP-4M positron injector. A stage-by-stage injection renovation which finally has increased its performance by two orders of magnitude is discussed as well. The injector positron production rate allowed high precision and unique experiments at VEPP-4M collider in the field of particle physics.

PACS: 29.20.db; 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-3 служит бустером для коллайдера ВЭПП-4М. Инжектором e^+ и e^- для него является комплекс ускорительных установок «Позитрон», который за более чем сорокалетний период претерпел ряд модернизаций, самая существенная из которых, в 1977 г., позволила повысить скорость накопления позитронов почти на два порядка, обеспечив тем самым возможность проведения тонких физических экспериментов на встречных пучках. В статье описывается итоговое состояние инжектора.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНЖЕКТОРА «ПОЗИТРОН»

В работающем ныне на комплексе ВЭПП-4 инжекторе позитроны получают путем конверсии электронов, ускоренных в сильноточном линейном ускорителе (ЛУ) до энергии 50 МэВ, с последующим ускорением в синхротроне до энергии 350 МэВ, и в накопителе ВЭПП-3, работающем в бустерном режиме, до 1,8 ГэВ. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

Электроны с энергией до 100 кэВ в течение 27 нс (оборот Б-4) инжектируются пушкой (ГПН) и ускоряются в двух секциях ЛУ до энергии 50 МэВ. В блоке конверсии e^- фокусируются на вольфрамный конвертер толщиной 3,5 мм (1 радиационная единица),

¹E-mail: Neufeld@inp.nsk.su

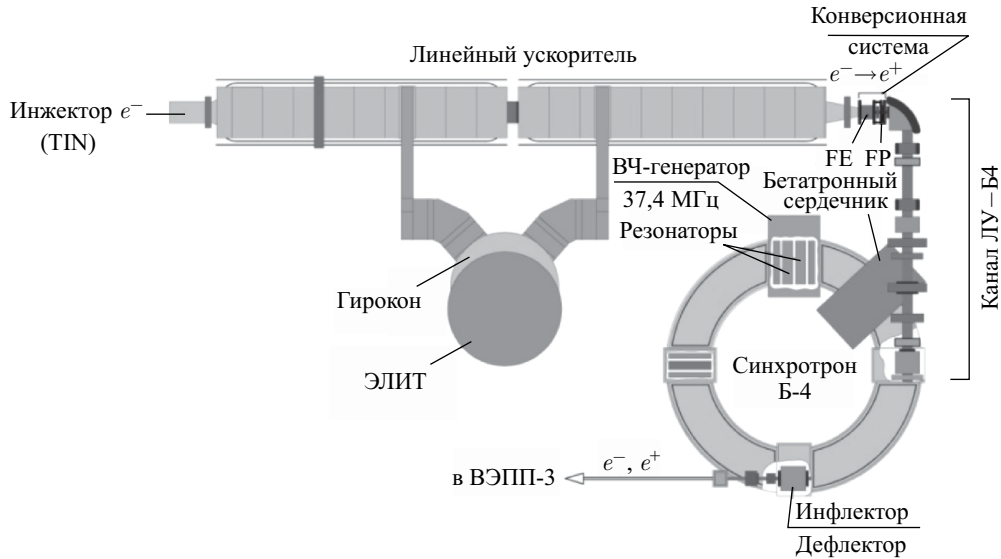


Рис. 1. Схема инжектора «Позитрон»

а полученные e^+ при энергии 7 МэВ (максимум спектра) направляются через систему транспортировки в Б-4, 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. При энергии 350 МэВ частицы через электронно-оптический канал переводятся в накопитель ВЭПП-3. Возбуждение ЛУ производится от импульсного гирокона, преобразующего энергию электронного пучка ускорителя ЭЛИТ-3А в энергию электромагнитных колебаний.

Основные импульсы позитронного источника, характеризующие его работу, приведены на рис. 2, а [1].

В высоковольтном ускорителе ЭЛИТ-3А 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. В ЭЛИТ-3А принят режим с 10%-м изменением напряжения высоковольтного контура в период прохождения импульса тока нагрузки, а требуемая монохроматичность пучка обеспечивается системой коррекции.

Ускорительная трубка ЭЛИТ состоит из четырех модулей. Между вторым и третьим модулями в эквипотенциальной области расположена фокусирующая линза из постоянных магнитов. На выходе из трубки стоит электромагнитная линза, служащая для согласования пучка с входом гирокона.

Источником СВЧ-мощности для ЛУ является импульсный гирокон мощностью 65 МВт [2]. Конструктивная схема гирокона изображена на рис. 2, б. Электронный пучок из ЭЛИТ-3А (1) попадает в цилиндрический резонатор круговой развертки (2). Поперечное ВЧ 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

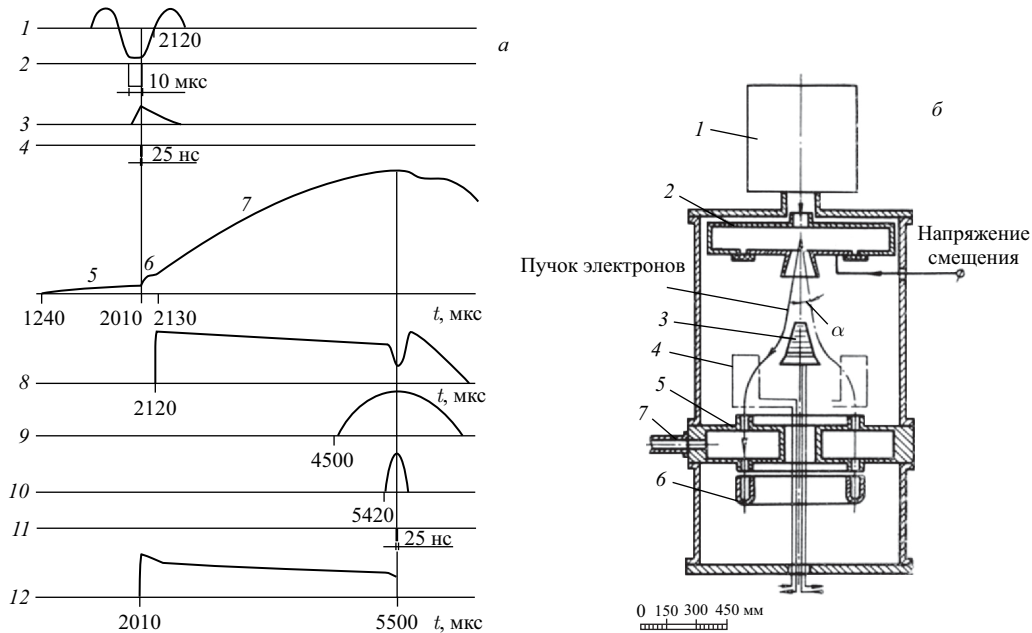


Рис. 2. а) Основные импульсы позитронного источника: 1, 2 — ускоряющее напряжение и ток ЭЛИТ-3А; 3, 4 — ускоряющее напряжение и ток пучка ЛУ; 5 — магнитное поле инжекции; 6 — поле бетатронного ускорения; 7 — поле синхротронного ускорения; 8 — ВЧ-напряжение резонатора Б-4; 9 — поле радиальной коррекции перед выпуском; 10 — поле вертикальной коррекции перед выпуском; 11 — ток выпущенного пучка; 12 — ток пучка на мониторе в процессе ускорения. б) Схема импульсного гирокона

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). ВЧ-мощность выводится из выходного резонатора двумя волноводами (7) через отверстия связи, сдвинутые по азимуту на 90° . Геометрия и местоположение отклоняющих систем выбирались по результатам численных расчетов траекторий электронов. Задача состояла в том, чтобы спроектировать такую отклоняющую систему, которая вписывалась в заданные конструктивные размеры гирокона и обеспечивала проводку пучка в коллектор с минимальными потерями тока при заданных параметрах пучка (диапазон рабочей энергии электронов 1500–1600 кэВ, ток 40–50 А). Расчеты показали, что при выбранной геометрии блока отклоняющих систем суммарное токооседание в электронно-оптическом тракте не превышает 6%. Выходной резонатор гирокона выполнен в виде цилиндра. Для прохождения электронного пучка в торцевых стенках имеются кольцевые щели, расположенные в узлах радиальных поверхностных токов.

Передача мощности от гирокона в ЛУ осуществляется двумя волноводами одинаковой длины, каждый из которых нагружен на отдельную секцию ускоряющей структуры. Сдвиг фаз между ускоряющими полями двух секций равен 90° , что позволяет ускорить частицы только в одном направлении. Для компенсации этого сдвига между секциями ЛУ

предусмотрен промежуток, который используется также для размещения линзы, средств наблюдения за пучком и корректоров. Такая схема максимально проста и обеспечивает сохранение бегущей волны в выходном резонаторе гироконатора во время переходного процесса, а ускорения частиц в противоположном направлении не требуется.

Ускоряющая структура ЛУ должна 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 [3]. Поскольку мощность из гироконатора выводится через два вывода энергии, ЛУ выполнен в виде двух отдельных секций, каждая из которых содержит по 10 ускоряющих резонаторов, в промежутках между которыми расположены 9 резонаторов связи.

Инжекция электронов в ЛУ производится из диодной пушки Пирса с плоским катодом и сетчатым анодом, обеспечивающей необходимые геометрические параметры пучка. Для обеспечения необходимых токов инжекции в электронной пушке применяется «чистый» катод из сплава иридий–лантан, изготовленного металлургическим способом. Средний срок непрерывной работы пушки $\sim 30\,000$ ч.

Для получения максимального выхода e^+ в заданном эмиттансе пучок ускоренных e^- необходимо сфокусировать на конвертере в пятно малого размера ($\approx 1\text{--}1,5$ мм). Чтобы обеспечить такой размер, пучок фокусируется дважды. Сначала электроны фокусируются длиннофокусной линзой так, чтобы получить минимальный размер пучка на выходе ускорителя (~ 1 см). Затем короткофокусной линзой производится фокусировка пучка на конвертере. Эмиттанс электронного пучка на выходе ЛУ составляет около $5 \cdot 10^{-4}$ рад·см. Оптимальная энергия позитронов, захватываемых в синхротроне, 7 МэВ; число захватываемых позитронов при оптимальных условиях и отсутствии потерь $N^+/N^- = 2 \cdot 10^{-7} E^2$ [4–6].

Фокусировка электронов на конвертер и собирание родившихся позитронов осуществляются продольным магнитным полем. Конструктивно блок конверсии (рис. 3, а) представляет собой две линзы — фокусирующую (1) и собирающую (2), между которыми находится панель (3) с конвертерной планкой (4). Линзы выполнены в виде катушек типа соленоида Битгера с внутренним диаметром 25 мм и наружным 45 мм. Число витков фокусирующей линзы — 23, собирающей — 3; толщина витков — 4 мм.

Магнитная система синхротрона состоит из четырех С-образных магнитов ($R_0 = 102$ см) азимутальной протяженностью по 88° каждый с четырьмя прямолинейными промежутками по 40 см между ними. Поперечное сечение электромагнита приведено на рис. 3 б. Магнитное поле создается током, протекающим по наружной (1) и внутренней (4) шинам в противоположных направлениях. Основной магнитный поток замыкается по шихтованному магнитопроводу (2), вклеенному эпоксидным компаундом в вакуумно-плотный кожух (3) с крышкой (5).

Коммутация квадрантов в прямолинейных промежутках выполнена с заземленной средней точкой, что позволило понизить вдвое максимальное напряжение на входе обмотки.

Однооборотная инжекция осуществляется по вертикали с захватом большого фазового объема. Впуск производится через наклонный канал в железе магнитопровода и впускной магнит, расположенный в прямолинейном промежутке. Инфлектор, осуществляющий удар по пучку только электрическим полем, расположен через один квадрант, в следующем за впускным, прямолинейном промежутке Б-4.

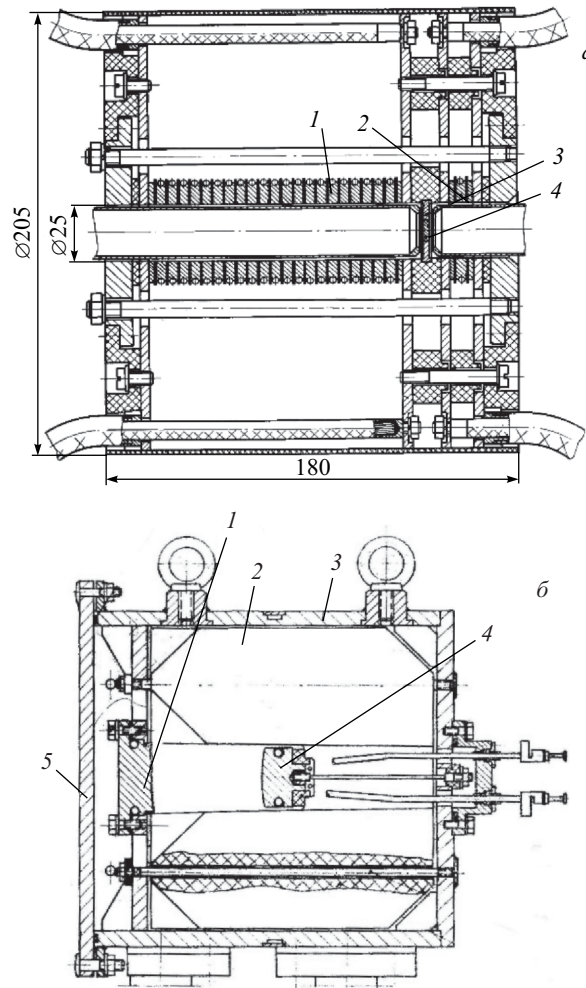


Рис. 3. а) Конверсионная система. б) Поперечное сечение электромагнита синхротрона

ВЧ-ускорение в Б-4 осуществляется на первой гармонике частоты обращения [4], что позволяет уменьшить потери при выпуске и захвате в ВЭПП-3. 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 $\lambda/4$, заполненную ферритами. Перестройка по частоте осуществляется подмагничиванием ферритов в электромагните.

Выпуск из Б-4 производится со среднего радиуса по вертикали, через выпускной магнит и наклонный канал в железе магнитопровода. Пучок после удара дефлектора совершает один оборот, прежде чем попадает в выпускной магнит. Дефлектор представляет собой короткозамкнутую петлю для удара по пучку магнитным полем.

С целью повышения надежности инжекционной части комплекса ВЭПП-4 была осуществлена модернизация ЭЛИТ-3А. Электронная пушка в модернизированном виде со-

стоит из катода, формирующего электрода, подогревателя и сетки, смонтированных на фланце. Катод представляет собой графитовую матрицу диаметром 46 мм, с кривизной 114 мм, в которой помещены 19 микрокатодов диаметром 7,4 мм, каждый из LaB₆.

С новой пушкой заметно уменьшилось токооседание в трубке (с 2 до 0,2%), возросла ее электрическая прочность, повысилась надежность. ЭЛИТ стал устойчиво работать в режиме 800–900 Дж в пучке, что дало возможность эффективнее работать с позитронами в ВЭПП-4. Срок службы пушек заметно возрос. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате всех модернизаций инжектора достигнута средняя скорость накопления позитронов в бустерный накопитель ВЭПП-3 до $10^8 e^+/c$. Для накопления пучка позитронов с током 50 мА в двух сгустках требуется около 15 мин. В заключение в таблице приведены основные особенности позитронного инжектора до и после 1977 г.

Основные особенности инжектора «Позитрон» до и после 1977 г.

Устройство	До 1977 г. (многооборотная инжекция)	После 1977 г. (однооборотная инжекция)
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 (50 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 два раза меньше, коэффициент трансформации = 6
ВЧ	Вторая гармоника	Первая гармоника
Выпуск	Снаружи, 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 1/4 оборота до выпуска	Вверху вакуумной камеры, в выпускном промежутке, удар за один оборот до выпуска
Конверсия	$430^-/250^+$, в канале Б4–ВЭПП-3	$50^-/7^+$, в канале ЛУ–Б4
Скорость накопления e^+ в ВЭПП-3	0,75 мкА/с ($\sim 1,2 \cdot 10^6 e^+/c$)	65 мкА/с ($10^8 e^+/c$)

Исследования и оптимизация катодного узла электронной пушки выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вассерман С. Б. и др.* Запуск позитрон-электронного источника для ВЭПП-4 // Тр. VI Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978. Дубна: ОИЯИ, 1979. Т. 1. С. 128–131.
2. *Будкер Г. И.* Авт. свид. № 340345 с приоритетом 24.06.1969 г. // Бюлл. изобретений. 1976. № 29. С. 221.
3. *Вещеревич В. Г. и др.* Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭПП-4. Ускоряющая структура. Препринт ИЯФ 83-140. Новосибирск, 1983.
4. *Авербух И. И. и др.* Ускоряющая система синхротрона Б-4. Препринт ИЯФ 2011-007. Новосибирск, 2011.