

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПОЗИТРОННЫХ ПУЧКОВ НА ИНЖЕКЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-5

*К. В. Астрелина, М. Ф. Блинов, Т. А. Всеволожская, Н. С. Диканский,
Ф. А. Еманов, Р. М. Лапик, П. В. Логачев, П. В. Мартышкин, А. В. Петренко,
Т. В. Рыбичкая, А. Н. Скринский, С. В. Шиянков, Т. А. Яскина**

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 27 июня 2007 г.

Разработан источник позитронов, позволяющий за один импульс получить $5 \cdot 10^8$ позитронов, ускоренных до энергии 70 МэВ. Для производства позитронов используется процесс рождения электрон-позитронных пар в электромагнитном ливне. Электромагнитный ливень генерируется в танталовой мишени пучком из $2 \cdot 10^{10}$ электронов с энергией 270 МэВ. Высокая эффективность сбора позитронов (коэффициент захвата $\Upsilon \approx 0.1 \text{ ГэВ}^{-1}$) обеспечивается оригинальной конструкцией согласующего устройства.

PACS: 29.27.-a, 29.25.-t, 29.17.+w

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно два процесса, практически пригодных для массового производства позитронов, — это β^+ -распад радиоактивных изотопов и рождение электрон-позитронных пар при прохождении фотона высокой энергии в поле ядра атома. Источники позитронов, основанные на β^+ -распаде, плохо подходят для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках из-за относительно невысокой интенсивности рождения частиц, а также по причине сложности сбора полученных позитронов в короткие узконаправленные сгустки, с которыми оперируют современные ускорители. В ускорительной технике для производства позитронов используется процесс рождения электрон-позитронных пар в электромагнитном ливне. Электромагнитный ливень можно получить, направив на мишень электронный пучок высокой энергии. Электроны теряют энергию в мишени, излучая жесткие тормозные фотоны. Эти фотоны в поле ядер порождают электрон-позитронные пары высокой энергии, которые излучают новые фотоны. Лавинообразное размножение частиц происходит до тех пор, пока электроны и позитроны не замед-

лятся настолько, что потери энергии заряженных частиц на тормозное излучение сравняются с ионизационными потерями. Эта критическая энергия для разных веществ может быть приблизительно подсчитана по формуле ([1], с. 213):

$$E_c = \frac{800 \text{ МэВ}}{Z + 1.2}, \quad (1)$$

где Z — количество протонов в атоме вещества мишени.

Современные источники позитронов для установок на встречных пучках работают по принципу [2, 3], впервые реализованному в 50-х годах прошлого века в Стэнфорде [4]. На рис. 1 показана общая схема подобного источника. Электронный пучок линейного ускорителя, сфокусированный на мишени из материала с высоким атомным номером, генерирует электромагнитный ливень. Рожденные в ливне позитроны выходят из мишени с большим угловым и энергетическим разбросом (рис. 2), поэтому лишь небольшую часть (обычно меньше 10 %) этих частиц удается сфокусировать и ускорить во втором линейном ускорителе. Начало этого ускорителя помещено в соленоидальное магнитное поле, обеспечивающее удержание позитронов вблизи оси ускоряющей структуры до тех пор, пока позитроны не приобретут продольный импульс, достаточно большой, что-

*E-mail: t.a.yaskina@gmail.com

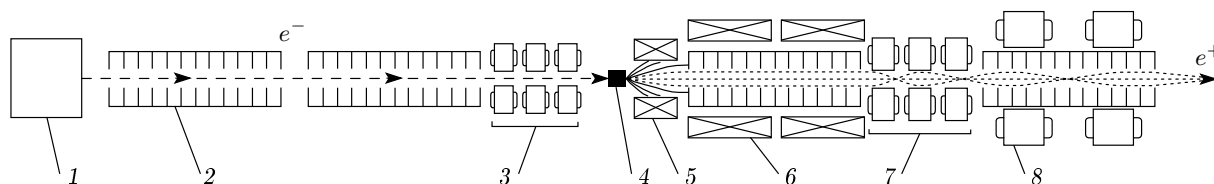


Рис. 1. Схема типичного источника позитронов, используемого в ускорительной технике: 1 — источник электронов, 2 — ускоряющая ВЧ-структура, 3 — квадрупольные линзы, фокусирующие электроны на мишень, 4 — конверсионная мишень, 5 — согласующее устройство, 6 — соленоид, в который вложена первая ВЧ-структура, ускоряющая позитроны, 7, 8 — квадрупольные линзы

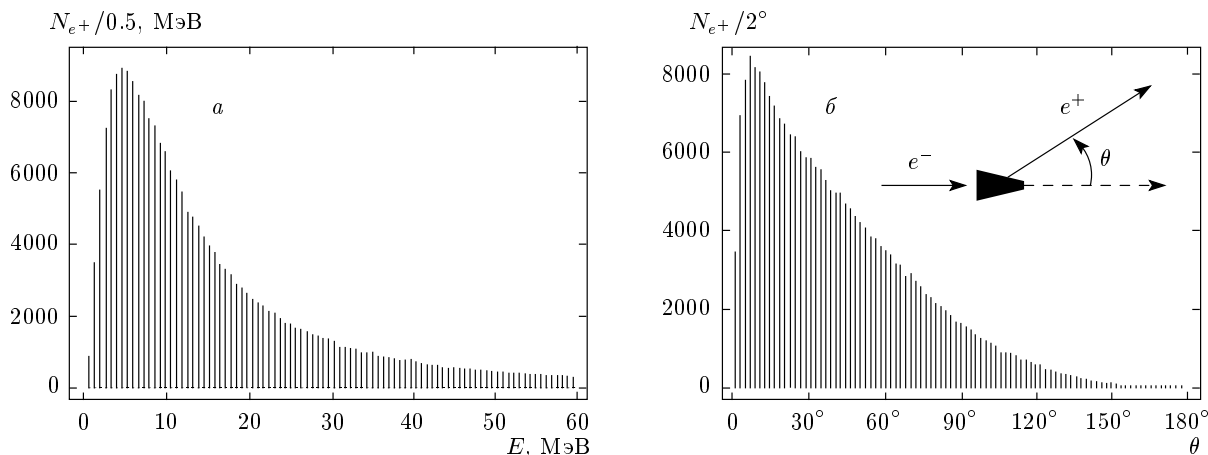


Рис. 2. Энергетическое (а) и угловое (б) распределения позитронов, вышедших из конверсионной мишени. Расчеты спектров проводились в программе GEANT [6]. Мишень — конус из тантала длиной 12 мм. Количество падающих на мишень электронов — $2 \cdot 10^{10}$, энергия электронов — 270 МэВ. Общее число вышедших из мишени позитронов — $2.4 \cdot 10^5$. При оптимальной толщине мишени спектры слабо зависят от энергии первичного электронного пучка

бы в остальной части ускорителя можно было использовать знакопеременную фокусировку квадрупольными линзами.

Число позитронов в максимуме электромагнитного ливня, рожденного электроном с энергией E , дается выражением [5]

$$N_+ \approx \frac{0.15}{\sqrt{\ln(E/E_c) - 0.37}} \frac{E}{E_c}. \quad (2)$$

Эта зависимость в большом диапазоне энергий близка к линейной (см. рис. 3), поэтому в качестве меры эффективности позитронного источника принято использовать величину

$$Y = \frac{1}{E} \frac{N_+}{N_-}, \quad (3)$$

называемую коэффициентом захвата позитронов (positron yield). Здесь N_- — количество падающих на мишень электронов, N_+ — число ускоренных позитронов. На действующих установках, многие из ко-

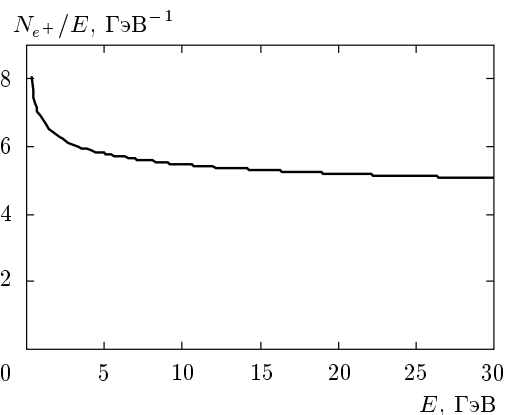


Рис. 3. Зависимость величины N_{e+}/E от энергии, рассчитанная по формуле (2). Энергия E меняется в диапазоне от 0.3 до 30 ГэВ

торых построены 20–30 лет назад, получен коэффи-

Таблица 1. Параметры наиболее производительных позитронных источников

Название установки	PEP-II	КЕКВ	DAFNE	БЕРС	DORIS	LIL	CESR	VEPP-5	
Научный центр	SLAC	КЕК	LNF	ИНЕР	DESY	CERN	Cornell University	БИНП	
Страна	США	Япония	Италия	Китай	Германия	Швейцария	США	Россия	
Частота ускоряющих ВЧ-структур, МГц	2856	2856	2856	2856	2998	2998	2856	2856	
Частота попаданий электронного пучка на мишень, Гц	120	50	50	12.5	50	100	60	50	
Энергия электронов на мишени, ГэВ	33	3.7	0.19	0.14	0.4	0.2	0.15	0.27	
Число электронов в сгустке	$5 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^{10*}$	$5.4 \cdot 10^{9*}$	$3.1 \cdot 10^{9*}$	$3 \cdot 10^{9*}$	$3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	
Величина поля в соленоиде, Тл	0.5	0.4	0.5	0.35	0.4	0.36	0.24	0.5	
Энергия позитронов после соленоида, МэВ	120	100	120*	100	$\approx 150^*$	90	$\approx 100^*$	70	
Материал мишени	W-25Re	W	W-25Re	W	W	W	W	Ta	
Тип согласующего устройства	АД	ЧВТ	АД	АД	ЧВТ	ЧВТ	ЧВТ	АД	
Параметры согласующего устройства	B , Тл	6	2	5	2.6	1.8	0.83	0.9	10
	L , см	10	4.5	12	12	4.5	4.4		8
Коэффициент захвата позитронов после линейного ускорителя, 1/ГэВ	0.054*	0.023	0.053	0.014	0.025	0.0295	0.013	0.1	
Энергия накопителя, ГэВ	1.15	3.5	0.51	1.3	0.45	0.5	0.22	0.51	
Энергетический акцептанс накопителя, $(\Delta E/E) \cdot 100\%$	2 %	0.5 %	3 %	1 %	1 %	2 %		2.4 %	
Производительность позитронов, 1/с	$8 \cdot 10^{12*}$	$2 \cdot 10^{11*}$	$2 \cdot 10^{10*}$	$2.5 \cdot 10^{8*}$		$2.2 \cdot 10^{10*}$	$6.6 \cdot 10^{10*}$	10^{11}	
Источники данных	[7–9]	[10, 11]	[12–14]	[15, 16]	[17, 18]	[17, 19]	[17, 20]		

Примечание. АД — адиабатическое (квазиадиабатическое) устройство, ЧВТ — четвертьволновый трансформатор. Звездочкой помечены параметры, которые не удалось найти в литературе, и поэтому они были подсчитаны по косвенным данным. Для инжекционного комплекса ВЭПП-5 указана проектная производительность.

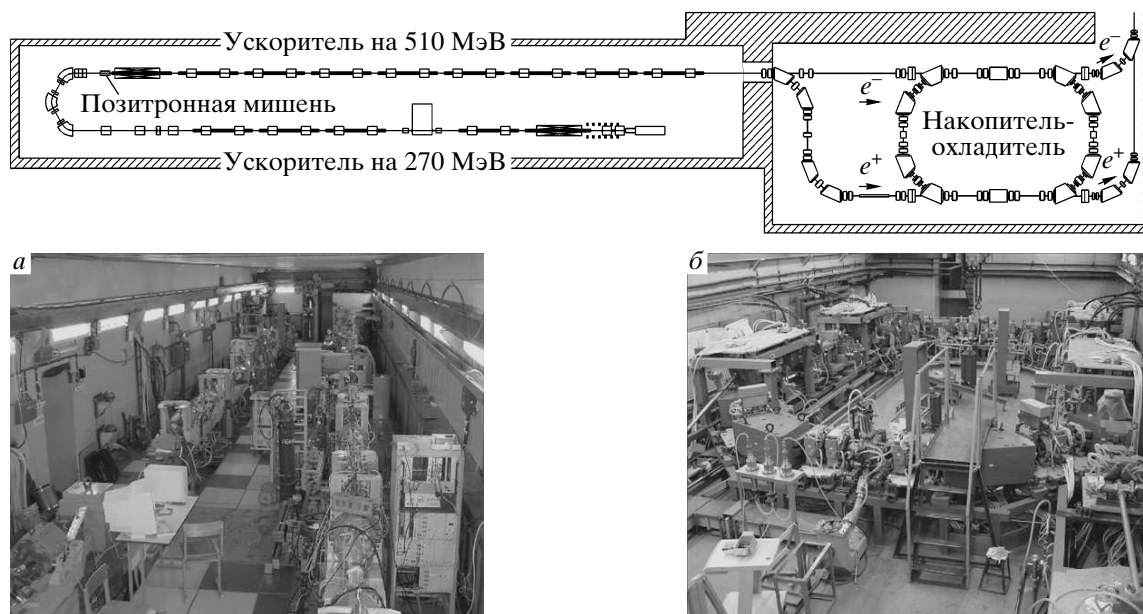


Рис. 4. Инжекционный комплекс ВЭПП-5: а — линейные ускорители, б — накопитель-охладитель

Таблица 2. Проектные параметры форинжектора

Конечная энергия пучков	510 МэВ
Число электронов в импульсе	$2 \cdot 10^{10}$
Число позитронов в импульсе	$5 \cdot 10^8$
Частота повторения импульсов	50 Гц
Энергетический разброс: электронного пучка	$\pm 1\%$
позитронного пучка	$\pm 3\%$
Эмиттанс: электронного пучка	$\sim 10^{-5}$ рад·см
позитронного пучка	$\sim 10^{-4}$ рад·см
Рабочая частота ВЧ	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	~ 60 МВт
Количество клистронов	4 шт.
Полная потребляемая мощность	600 кВт

Таблица 3. Проектные параметры накопителя-охладителя

Энергия пучков	510 МэВ
Периметр	2740 см
Частота ВЧ	700 МГц
Время радиационного затухания	18 мс (τ_z)
Выходные параметры пучков: число e^+ или e^-	$2 \cdot 10^{10}$
энергетический разброс	$\pm 0.07\%$
продольный размер	4 мм (σ_z)
горизонтальный эмиттанс	$2.3 \cdot 10^{-6}$ рад·см
вертикальный эмиттанс	$0.5 \cdot 10^{-6}$ рад·см
Адмитансы: A_x	10^{-2} рад·см
A_z	$4 \cdot 10^{-3}$ рад·см
Ширина сепаратрисы ($\Delta E/E$)	0.024
Полная потребляемая мощность	800 кВт

цент захвата позитронов $Y = 0.02-0.06 \text{ ГэВ}^{-1}$ (см. табл. 1).

В данной статье представлены результаты работ по созданию интенсивного источника позитронов на инжекционном комплексе ВЭПП-5 в Институте

ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Инжекционный комплекс ВЭПП-5 предназначен для обеспечения релятивистскими электронами и позитронами экспериментов по физике элементарных час-

тиц на встречных электрон-позитронных пучках в ИЯФ СО РАН. Особое внимание при разработке позитронного источника было уделено магнитной системе сбора позитронов после конверсионной мишени. В результате для этой цели удалось создать импульсную аксиальную магнитную линзу с достаточно качественным магнитным полем, что означает малость поперечной компоненты магнитного поля, отклоняющей позитроны от оси ускорителя. Это обеспечило источнику позитронов довольно большой коэффициент захвата позитронов ($Y \approx 0.1 \text{ ГэВ}^{-1}$) при относительно скромных затратах на создание установки. Разработанный источник позволяет за один импульс получить $5 \cdot 10^8$ позитронов, ускоренных в первой после мишени ускоряющей секции до энергии 70 МэВ. В падающем на мишень электронном пучке содержится $2 \cdot 10^{10}$ электронов с энергией 270 МэВ.

Важно отметить, что данный результат был получен на основе многолетнего опыта разработки и эксплуатации позитронных источников в ИЯФ СО РАН. Тематика встречных электрон-позитронных пучков развивается в Институте с начала 60-х годов прошлого века. Первой из установок был комплекс ВЭПП-2 на энергию 2×700 МэВ, запущенный в 1964 г. В отличие от ныне действующих установок, в которых используется линейный ускоритель позитронов, инжекция в накопитель ВЭПП-2 осуществлялась без дополнительного ускорения. Электронный пучок имел энергию 250 МэВ. Энергия инжекции позитронов выбиралась по оптимальному соотношению коэффициента конверсии, фазового объема позитронов, времени радиационного затухания в накопителе и составляла около половины энергии электронов. Указанные выше параметры оптимизировались по максимуму скорости накопления позитронов.

Фокусировка электронов и позитронов при конверсии осуществлялась параболическими линзами, специально разработанными для этой цели [21]. Каждая линза представляла собой два тонкостенных параболоида вращения из бериллия, соединенных вершинами. Ток, протекающий вдоль оси параболоидов, создает в пространстве между ними магнитное поле, обеспечивающее аксиально-симметричную фокусировку пучка, проходящего параллельно оси сквозь тонкие стенки линзы. Апертура линз составляла 20 мм, диаметр перемычки — 5 мм. Толщина стенок на краю апертуры равна 0.12 мм, а у перемычки — 0.2 мм. Ток, питающий линзу, был равен 120 кА, максимальное поле — около 10 Тл. Фокусное расстояние для электронов с

энергией 250 МэВ составляло 17.5 см, для позитронов с энергией 110 МэВ — 7 см. Электронный пучок на конвертере фокусировался в пятно со среднеквадратичным радиусом 0.5 мм [22]. Коэффициент захвата позитронов достигал значения $1 \cdot 10^{-4}$ на первичный электрон. При токе электронов из ускорителя-инжектора, равном 300 мА, была получена скорость накопления позитронов 700 мкА/мин. Предельный накопленный ток позитронов составлял около 20 мА.

Параболические линзы, сослужившие свою службу на первой стадии работы ВЭПП-2, впоследствии были заменены более совершенными системами для формирования пучков при конверсии (литиевыми линзами), также целенаправленно разработанными в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера [23]. Недостатком параболических систем является наличие перемычки между параболоидами, выводящей из режима фокусировки центральную, самую интенсивную часть пучка. С ростом энергии частиц, сопровождающимся уменьшением углового разброса и светосилы фокусировки после конвертера, такой недостаток становится все более существенным. Именно такая проблема возникла на позитронном источнике ВЭПП-3 [24]. При почти вдвое более высокой, чем на ВЭПП-2, энергии — 430 МэВ у электронов (250 МэВ у позитронов) и в 4 раза меньшем аксептансе накопителя применение параболических линз было неоптимальным. Задача фокусировки электронов и собирания позитронов после конверсии была решена с помощью литиевых линз. Линза представляла собой цилиндр из лития, ограниченный на торцах дисками из бериллия, служащими как для удержания лития в заданном объеме, так и для аксиально-симметричного подвода тока, пропускаемого вдоль оси цилиндра. Ограничением силы линзы служит давление поля на токоподводящие диски, толщина которых ограничена рассеянием частиц, составляющим заметную часть от рассеяния во всей линзе. Электронная линза имела длину 1.7 см, диаметр 6 мм и диски толщиной 1 мм. Угол рассеяния в линзе и дисках составлял около 4.5 мрад. При поле на поверхности, равном 54 кЭ, фокусное расстояние для электронов с энергией 430 МэВ составляло 5 см, радиус пятна на конвертере — 0.3 мм. Позитронная линза имела длину 1.6 см, диаметр 5 мм, толщину дисков 0.4 мм и фокусное расстояние 4 см при максимальном поле 33 кЭ.

Примерно такая же пара линз была установлена и на комплексе ВЭПП-2 взамен параболических линз, обеспечив его надежную работу в течение нескольких последующих десятилетий.

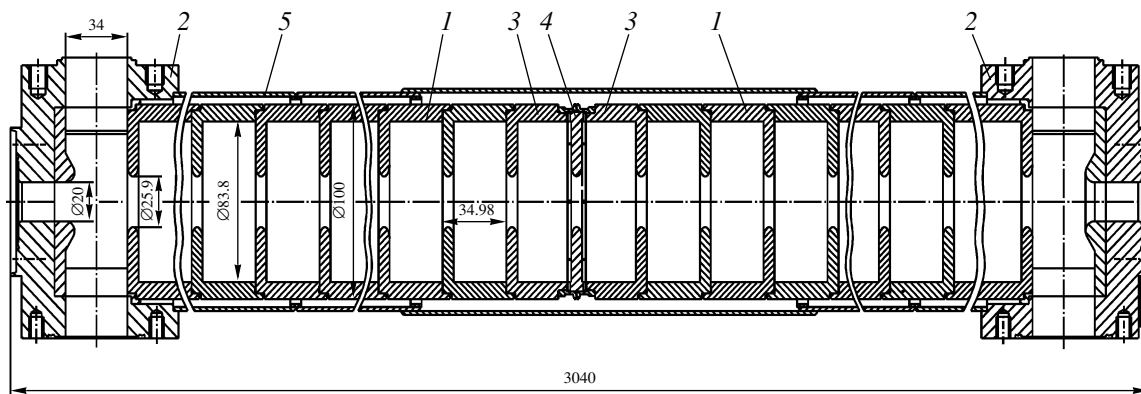


Рис. 5. Ускоряющая ВЧ-структура инжекционного комплекса ВЭПП-5: 1 — регулярная ускоряющая ячейка, 2 — трансформатор типа волны, 3 — переходная (соединительная) ускоряющая ячейка, 4 — соединительная диафрагма, 5 — рубашка охлаждения

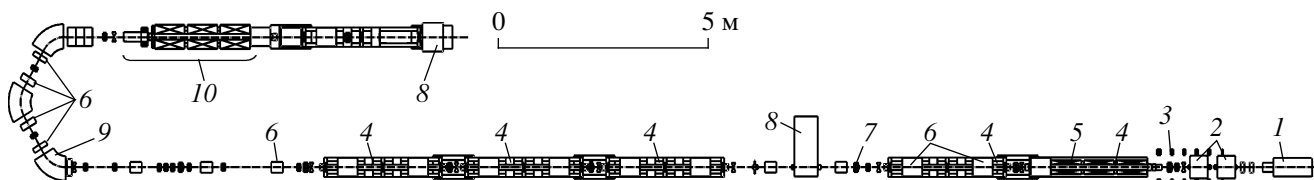


Рис. 6. Схема позитронного источника инжекционного комплекса ВЭПП-5: 1 — электронная пушка, 2 — субгармонический группирователь, 3 — фокусирующая катушка, 4 — ускоряющая структура, 5 — катушка соленоида, 6 — квадрупольная линза, 7 — корректор, 8 — спектрометр, 9 — поворотный магнит, 10 — конверсионная система

На комплексе ВЭПП-3 позднее была осуществлена схема инъекции позитронов с энергией 7 МэВ, получаемых при конверсии пучка электронов с энергией 50 МэВ из линейного ускорителя, с доускорением до энергии 350 МэВ в синхротроне Б-4. Более того, в такой схеме накопитель ВЭПП-3 использовался как промежуточный для коллайдера ВЭПП-4 [25]. Это позволяло вести накопление позитронов практически в постоянном режиме. Накопленные пучки ускорялись в ВЭПП-3 до 2 ГэВ и запускались в ВЭПП-4, обеспечивая более высокую светимость установки при энергии эксперимента (2×5.5 ГэВ).

Особого упоминания заслуживает еще один проект электрон-позитронных встречных пучков, разрабатывавшийся в ИЯФ в самом конце 1970-х и начале 1980-х гг. Это проект линейных пучков на энергию 2×500 ГэВ. В этом проекте конверсия электронов предполагалась через посредство ондуляторного излучения, что позволяло обеспечить продольную поляризацию вторичных пучков. Создание этой установки требует использования линейных ускоряющих систем с очень высоким (до 100 МэВ/м) тем-

пом ускорения. Эта задача и сегодня ожидает своего решения. Что же касается основных параметров и узлов системы конверсии для нее, необходимая работа была проведена как на концептуальном, так и на лабораторном уровне. Были определены основные характеристики пучков — энергия первичных электронов около 150 ГэВ, обеспечивающая оптимальное соотношение плотности спектра вторичных частиц и степени их поляризации, энергия излучаемых фотонов в районе 20 МэВ, длина ондулятора 150 м и длина волны его периодической структуры 1 см, эффективность и параметры конвертера и собирающей литиевой линзы. Были изготовлены и испытаны пробные образцы спиральных ондуляторов двух типов — импульсного и сверхпроводящего [26–28].

2. ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-5

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 (рис. 4, табл. 2, 3) — это современный источник релятивистских электронов и позитронов, строящийся в Институте ядерной физики для обеспечения рабо-

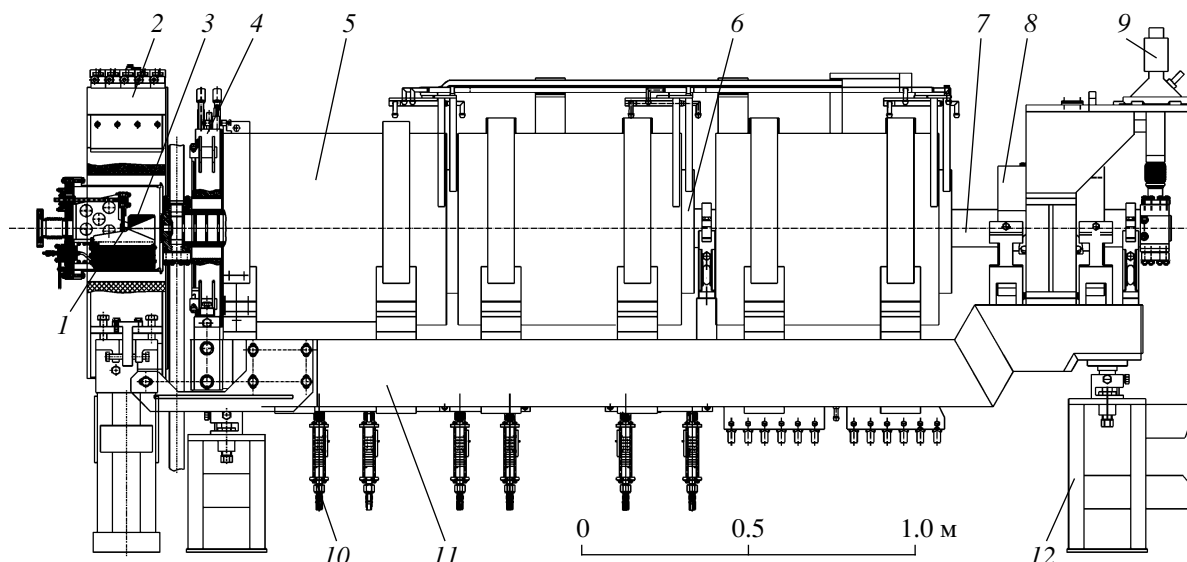


Рис. 7. Конверсионная система: 1 — конверсионная мишень, 2 — катушка конвертера, 3 — согласующее устройство, 4 — согласующая катушка, 5, 6 — секции соленоида, 7 — ускоряющая структура, 8 — квадрупольная линза, 9 — вакуумный насос, 10 — расходомер охлаждающей воды, 11 — подставка соленоида, 12 — опора

ты установок на встречных электрон-позитронных пучках. Основу инжекционного комплекса составляет форинжектор — два линейных ускорителя на энергии 270 МэВ и 510 МэВ. Электроны из первого ускорителя после поворота в магнитном поле на 180° попадают на конверсионную мишень и производят позитроны, часть из которых затем ускоряется до 510 МэВ во втором ускорителе. Также предусмотрен режим работы форинжектора, когда ускоряются только электроны. В этом случае отдельные электронные сгустки направляются мимо мишени во второй линейный ускоритель, настроенный так, чтобы ускорять электроны с 270 МэВ до 510 МэВ.

Помимо линейных ускорителей в состав инжекционного комплекса входит циклический накопитель частиц. После линейного ускорителя электронные либо позитронные пучки инжектируются в накопитель, где движутся в магнитном поле по замкнутой траектории. Через определенное количество оборотов к циркулирующему сгустку добавляется очередная порция частиц из линейного ускорителя. После набора необходимого количества частиц пучок выпускается потребителям. В силу малости коэффициента конверсии электронов в позитроны, большую часть времени накопитель должен работать именно с позитронами. Электроны также могут быть инжектированы в кольцо накопителя и обра-

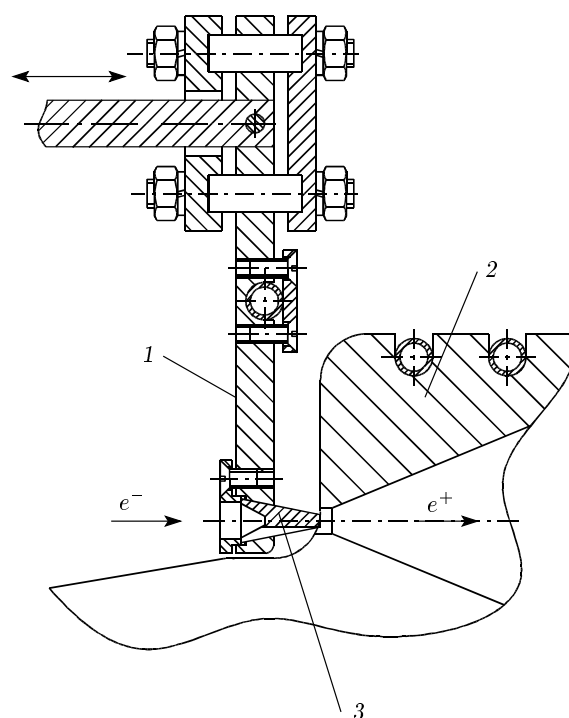


Рис. 8. Конструкция держателя мишени: 1 — перемещаемый держатель мишени, 2 — импульсная магнитная линза (концентратор потока), 3 — конверсионная мишень

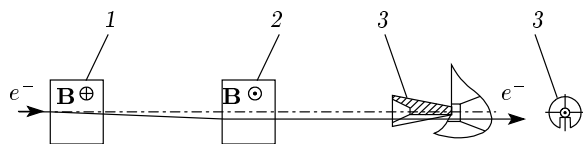


Рис. 9. Система параллельного переноса электронного пучка: 1, 2 — магниты, 3 — конверсионная мишень

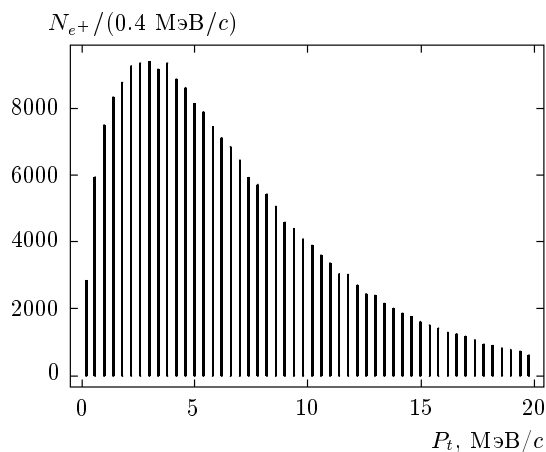


Рис. 10. Распределение поперечной компоненты импульса позитронов, родившихся в конверсионной мишени. Спектр получен с помощью программы GEANT [6] (количество падающих на мишень электронов — $2 \cdot 10^5$, энергия электронов — 270 МэВ, длина танталовой мишени — 12 мм). Общее число вышедших из мишени позитронов — $2.4 \cdot 10^5$

щаться они будут в противоположном направлении (см. рис. 4). Одновременное накопление обоих сортов частиц, вращающихся в противоположные стороны, конструкцией накопителя не предусмотрено. При движении в поле поворотных магнитов накопителя заряженная частица излучает. В результате этого появляется сила реакции излучения, направленная против вектора импульса частицы. Средние потери энергии частиц на излучение компенсируются в накопителе ускоряющим ВЧ-резонатором, работающим на частоте, кратной частоте обращения пучка по равновесной орбите. Под действием силы реакции излучения амплитуда колебаний частиц относительно равновесной орбиты постепенно затухает [29]. При этом в сопровождающей системе, движущейся со средней скоростью пучка, хаотическая скорость частиц уменьшается, иначе говоря, пучок «охлаждается». Для накопителя-охлаждителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 время радиационного затухания приблизительно равно 20 мс, что соответствует $2 \cdot 10^5$ оборотам пучка. Равновесный фазовый

объем пучка в накопителе определяется квантовыми флуктуациями синхротронного излучения [30]. Максимальная интенсивность циркулирующего сгустка ограничена когерентными неустойчивостями, возникающими при взаимодействии электромагнитных полей сгустка с ВЧ-резонатором, неоднородностями вакуумной камеры, впускными и выпускными устройствами и т. д. [31]. Рабочая энергия накопителя-охлаждителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 выбрана равной 510 МэВ с тем расчетом, чтобы выпускаемые из него пучки можно было без дополнительного ускорения использовать для рождения φ -мезонов с массой $1019 \text{ МэВ}/c^2$.

Охлаждение и накопление пучков перед их инжекцией в основной циклический ускоритель, где происходит столкновение электронов и позитронов (коллайдер), часто используется по нескольким причинам. Накопление и охлаждение частиц непосредственно в коллайдере, в принципе, возможно, так как времена накопления и охлаждения пучка значительно меньше времени его жизни в циклическом ускорителе. Однако инжекция пучка с большим фазовым объемом требует соответственно большой апертуры вакуумной камеры ускорителя. Поэтому часто выгоднее использовать относительно небольшой предварительный накопитель-охлаждитель частиц, который позволяет в последующей электронно-оптической системе уменьшить апертуру вакуумной камеры, а следовательно, размеры и стоимость магнитных элементов. Помимо этого, потери электронов и позитронов на стенках вакуумной камеры коллайдера служат источником фоновых событий в детекторе. Резкое увеличение размеров пучка в моменты инжекции приводит к соответствующему увеличению уровня этого фона, что нежелательно, так как может повлечь за собой выход из строя чувствительной регистрирующей аппаратуры детектора.

3. ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

3.1. Линейный ускоритель электронов

Ускорение электронов и позитронов осуществляется в волноводных структурах на бегущей волне (рис. 5). Основу структуры составляет цилиндрический диафрагмированный волновод, в котором распространяется электромагнитная волна, с фазовой скоростью, равной скорости света в вакууме ([1], с. 26; [32, 33]). Характерное значение продольной компоненты электрического поля в ускоряющей структуре порядка 20 МВ/м. Набирая энергию в по-

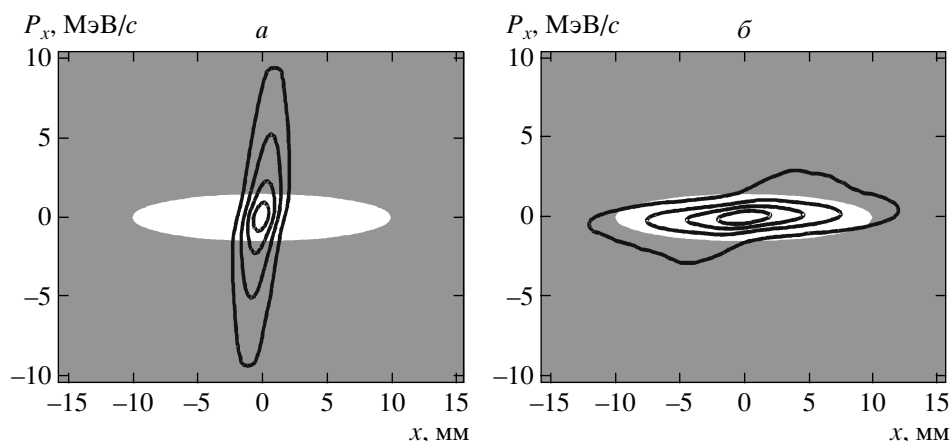


Рис. 11. Фазовые портреты позитронного пучка, изображенные линиями постоянной плотности (численное моделирование): а) портрет пучка в конце конверсионной мишени, б) в конце согласующего устройства. Белым овалом обозначен акцептанс ускоряющей структуры, помещенной в соленоидальное магнитное поле

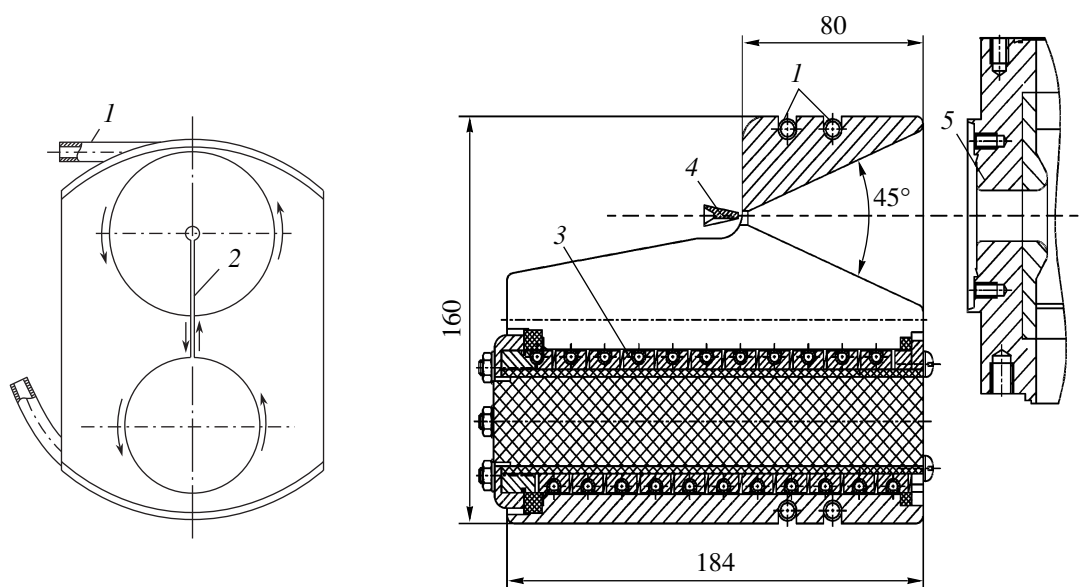


Рис. 12. Схема концентратора магнитного потока, используемого в позитронном источнике инжекционного комплекса ВЭПП-5. Стрелками обозначены поверхностные токи: 1 — трубки водяного охлаждения, 2 — паз между конической полостью и полостью первичной обмотки (ширина паза — 0.2 мм; на рисунке ширина паза изображена в неправильном масштабе, так как иначе оба края разреза сливаются), 3 — импульсная катушка (первичная обмотка), 4 — конверсионная мишень, 5 — начало ускоряющей структуры

ле такой величины, электроны или позитроны приобретают скорость, достаточно близкую к скорости света, уже на первых десяти сантиметрах пути и в дальнейшем движутся синхронно с бегущей волной. Для создания в ускоряющих структурах электрических полей высокой напряженности используются мощные клистронные СВЧ-усилители дециметрового

диапазона. На инжекционном комплексе ВЭПП-5 большинство структур обеспечивают средний темп ускорения, равный 18 МэВ/м. К двум структурам, ускоряющим частицы с малыми начальными энергиями (одна структура расположена после источника электронов, вторая — после конверсионной мишени), подводится повышенная СВЧ-мощность. Сред-

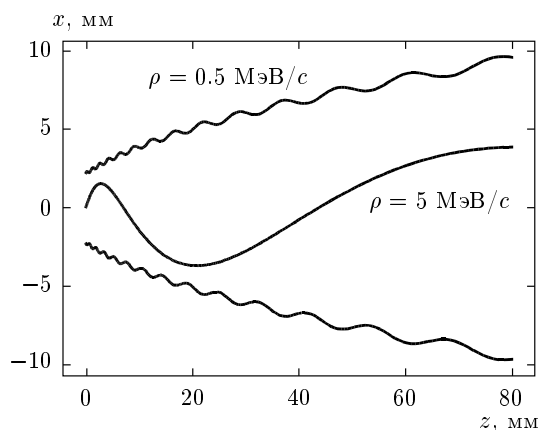


Рис. 13. Проекция траекторий позитронов, движущихся через концентратор магнитного потока, на горизонтальную плоскость xz (численное моделирование)

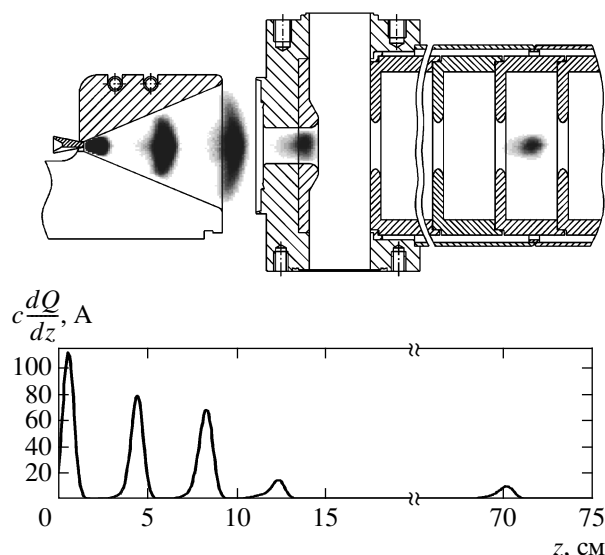


Рис. 15. Портреты позитронного пучка в разные моменты времени (численное моделирование)

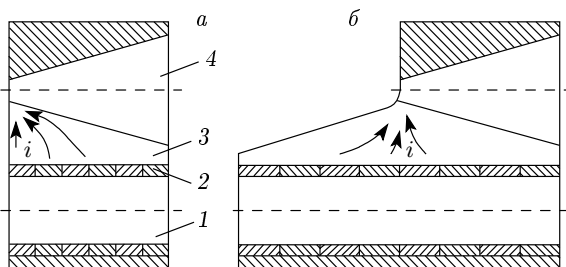


Рис. 14. Распределение токов (i) по одной из поверхностей паза (3), соединяющего полость первичной обмотки (1) и полость концентратора потока (4): а) длина первичной обмотки (2) равняется длине конической полости; б) удлинение первичной обмотки позволяет уменьшить паразитное влияние продольных компонент токов

ний темп ускорения в этих двух структурах составляет 25 МэВ/м.

Параметры ускоряющей структуры требуют источника электронов, способного производить электронные пучки с энергией на уровне 200 кэВ и длиной около 1 см. Существуют два подхода к созданию источников электронов для ускорителей на бегущей волне. Можно получить требуемый электронный сгусток, облучая коротким лазерным импульсом фотокатод с приложенным к нему вытягивающим электрическим полем ([1], с. 419), либо сжимая в продольном направлении более длинный пучок, полученный в источнике на основе термоэмиссионного катода. На инжекционном комплексе используется термоэмиссионный источник электронов с последу-

ющей времяпролетной системой группировки.

Основные элементы системы группировки — это ВЧ-резонаторы и свободные промежутки. При проходе через резонатор частицы приобретают разную энергию в зависимости от своего продольного положения в сгустке. Фаза влета выбирается таким образом, чтобы головные частицы замедлялись, а хвостовые — ускорялись. Тогда в свободном промежутке сгусток сжимается в продольном направлении. При продольном сжатии сгусток электронов начинает расширяться в поперечном направлении за счет собственного заряда. Для подавления этого эффекта группировка пучка и его движение в первой ускоряющей секции сопровождается соленоидальной фокусировкой.

На инжекционном комплексе электронный и позитронный ускорители расположены параллельно друг другу, а частицы в них движутся в противоположных направлениях (см. рис. 6). Перед конверсионной мишенью электронный пучок разворачивается в магнитном поле на 180°. Использована изохронная схема ахроматического поворота, где в первом приближении энергетический разброс пучка не приводит к увеличению его поперечного и продольного размеров. Удлинение электронного, а следовательно, и позитронного пучка нежелательно, так как влечет за собой увеличение энергетического разброса в ускоренном позитронном пучке, что затрудняет его инжекцию в накопитель-охладитель.

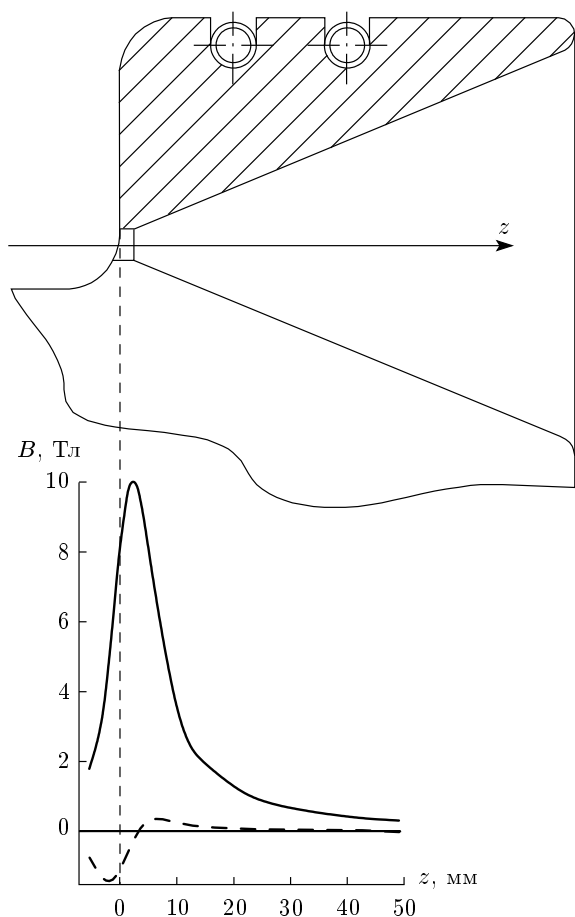


Рис. 16. Результаты измерения магнитного поля концентратора. Сплошная линия — продольное поле, штриховая — поперечное

К настоящему времени создан и успешно испытан на проектных параметрах электронный линейный ускоритель инжекционного комплекса ВЭПП-5 на энергию 270 МэВ (рис. 6), а также конверсионная система (рис. 7). В 2007 г. планируется начало работ с электронным пучком в накопителе-охладителе, в 2008 г. — с позитронным пучком. Сдача инжекционного комплекса в эксплуатацию на проектных параметрах планируется на конец 2008 г.

3.2. Конверсионная мишень

Для изготовления конверсионных мишеней чаще всего применяют тугоплавкие тяжелые металлы: тантал или сплав вольфрама с рением, имеющие радиационную длину $X_0 = 3-4$ мм. Эти металлы обладают большим зарядом ядра и, следовательно, отвечают низкой критической энергии $E_c \approx 10$ МэВ.

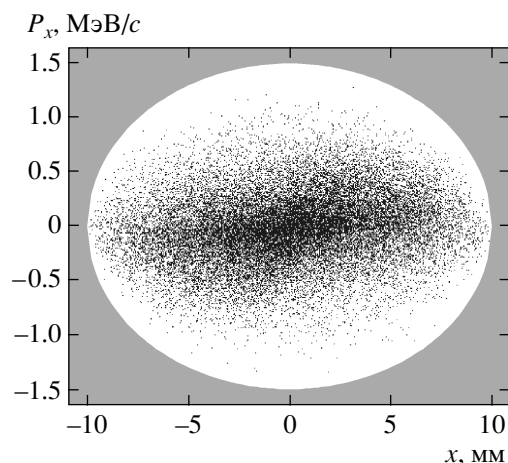


Рис. 17. Фазовый портрет позитронного пучка в конце соленоида (численное моделирование). Белым овалом обозначен акцептанс соленоида

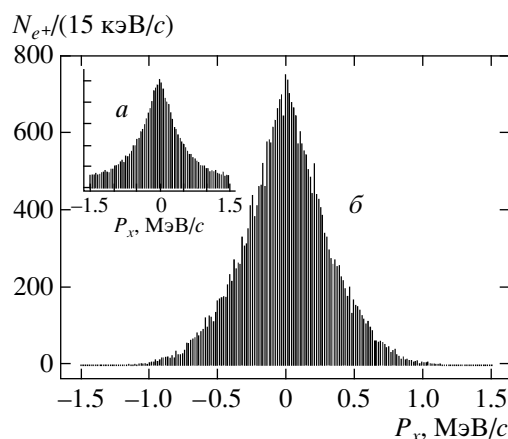


Рис. 18. Распределение позитронов по горизонтальному импульсу в начале (а), в конце (б) соленоида

Кроме того, данные металлы, а также их сплавы обладают большой механической прочностью и высокой температурой плавления, что важно, поскольку конверсионная мишень должна выдерживать многократные попадания интенсивного электронного пучка. В результате резкого термического расширения материала под действием электронного пучка в конверсионной мишени образуется ударная волна, которая может иметь интенсивность, достаточную для разрушения мишени. Экспериментально установлено, что металлические мишени на основе сплава вольфрама с рением способны выдерживать импульсное тепловое воздействие электронного сгустка с плотностью энергии до $2 \cdot 10^{12}$ ГэВ/мм² [34].

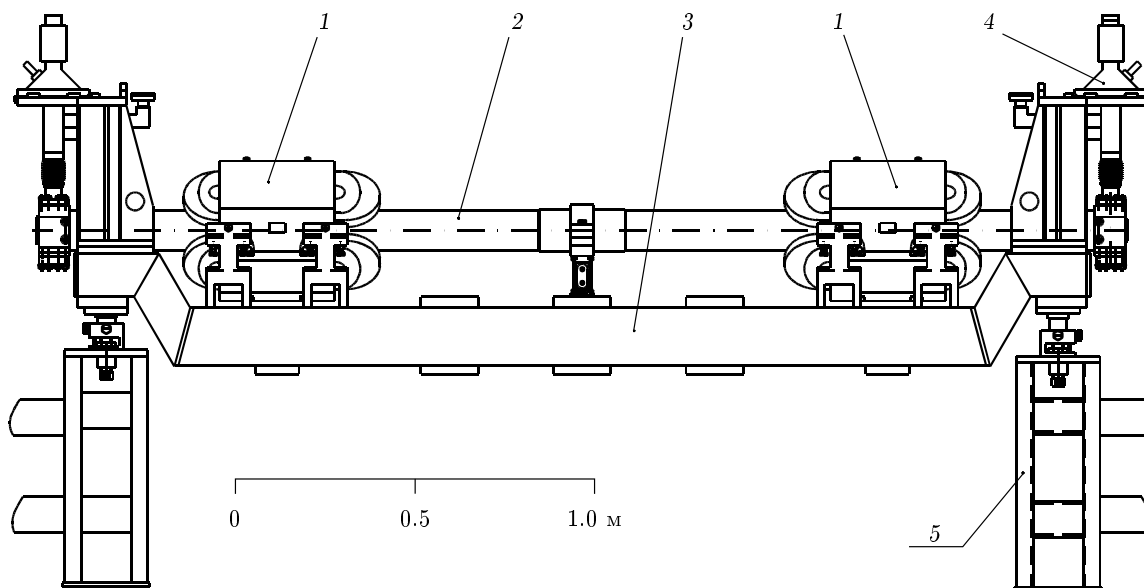


Рис. 19. Ускоряющая структура с квадрупольными линзами: 1 — квадрупольная линза, 2 — ускоряющая структура, 3 — подставка, 4 — вакуумный насос, 5 — опора

На инжекционном комплексе ВЭПП-5 электронный пучок, сфокусированный на площади 1 мм^2 , имеет плотность энергии $0.27 \text{ ГэВ} \cdot 2 \cdot 10^{10} \approx 5 \cdot 10^9 \text{ ГэВ/мм}^2$. Таким образом, интенсивность электронного пучка в нашем случае заведомо меньше предельно допустимой. Средняя мощность, выделяющаяся в мишени, также невелика: при частоте импульсов электронного пучка, равной 50 Гц, с мишени необходимо снимать приблизительно 30 Вт тепловой мощности [35].

В качестве материала мишени выбран тантал (радиационная длина $X_0 = 4 \text{ мм}$). Танталовая мишень в виде конуса с минимальным диаметром 2.5 мм и длиной 12 мм закреплена в держателе, который с помощью тяги может перемещаться в продольном направлении на $\pm 2 \text{ мм}$ из положения, указанного на рис. 8. Мишень также имеет специальный паз, через который электронный пучок может инжектироваться в позитронный ускоритель. В этом случае при помощи двух магнитов пучок параллельно переносится перед мишенью на 2 мм вниз (рис. 9).

3.3. Соленоидальная фокусировка позитронов

Поперечная компонента импульса большей части позитронов, выходящих из мишени, не превышает $15 \text{ МэВ}/c$ (рис. 10). ВЧ-структура слабо меняет поперечный импульс ускоряемых частиц. Поэтому траектория позитрона в поперечной плоскости внутри

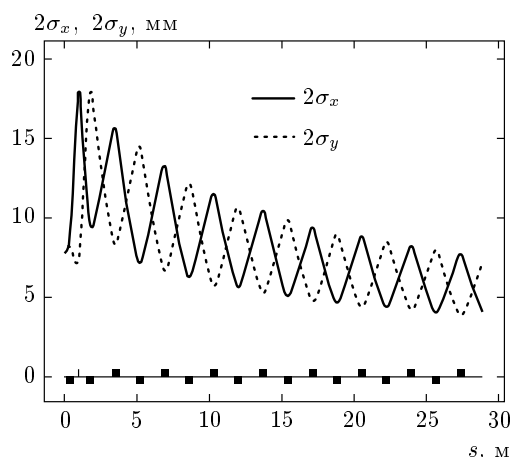


Рис. 20. Минимизированные поперечные размеры пучка в позитронном ускорителе инжекционного комплекса (без учета ограничения по апертуре вакуумной камеры)

помещенной в соленоид структуры будет иметь вид ларморовской окружности. Чтобы ларморовская орбита позитрона с поперечным импульсом $15 \text{ МэВ}/c$ поместилась внутри ускоряющей секции с апертурой радиусом 1 см, необходимо продольное магнитное поле величиной около 10 Тл. Создавать такие поля в достаточно большом объеме можно только при помощи сверхпроводящих магнитов, использование которых в конверсионной системе технически сложно из-за сильного радиационного фона. Посто-

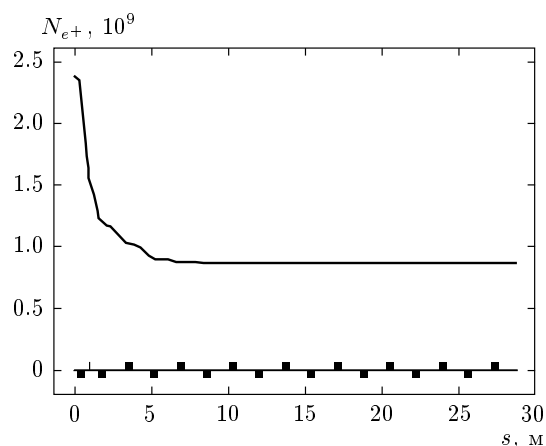


Рис. 21. Количество позитронов в зависимости от положения пучка вдоль линейного ускорителя инжекционного комплекса (от соленоида конверсионной системы до впускных каналов накопителя-охладителя)

янное соленоидальное поле, создаваемое магнитами с охлаждаемыми водой обмотками, ограничено величиной 0.5 Тл. Максимальный поперечный импульс позитронов в таком поле при диаметре апертуры камеры 2 см равен 1.5 МэВ/с.

Поскольку размер электромагнитного ливня в конце мишени в несколько раз меньше диаметра апертуры ускоряющей секции, существует принципиальная возможность, используя магнитную фокусировку, в согласии с теоремой Лиувилля [2, 36] уменьшить угловой разброс позитронов за счет расширения пучка до диаметра апертуры ускоряющей секции. Это уменьшит потери позитронов в последующем ускорителе. Полностью исключить потери позитронов на входе в ускоряющую секцию невозможно, так как при величине поля соленоида конверсионной системы, равной 0.5 Тл, аксептанс ускоряющей структуры меньше фазового объема пучка.

Магнитная линза, проводящая описанную трансформацию фазового объема, т. е. фокусирующая позитроны перед ускоряющей структурой, называется согласующим устройством. Принцип работы согласующего устройства проиллюстрирован на рис. 11, где на фоне аксептанса ускоряющей структуры изображены фазовые портреты позитронного пучка перед согласующим устройством и после него. Под аксептансом структуры на рис. 11 мы понимаем проекцию фазового объема, доступного для ускорения частиц, на плоскость P_x-x . Если частица попадает в эту область, то для захвата в ускоряющей структуре она еще должна удовлетворять некоторым условиям

по остальным координатам. Если же частица не попадает внутрь белого эллипса, тогда она гарантированно теряется на стенках ускоряющей структуры.

Существуют три основных типа согласующих устройств: четвертьволновый трансформатор, концентратор магнитного потока и плазменная либо литиевая линза [2]. Во всех этих устройствах используется импульсное магнитное поле большой величины. В плазменной линзе частицы фокусируются азимутальным магнитным полем, возникающим в среде, через которую параллельно оси пучка пропущен электрический ток. Четвертьволновый трансформатор представляет собой короткий импульсный соленоид. Конверсионная мишень располагается в начале этого соленоида, а его длина и магнитное поле подбираются таким образом, чтобы поперечный импульс позитронов компенсировался ударом, который частицы получают на выходе соленоида. Основным недостатком как линз с азимутальным магнитным полем, так и четвертьволнового трансформатора является избирательность этих устройств по энергии частиц. Четвертьволновый трансформатор и плазменная линза хорошо фокусируют позитроны только в узкой части спектра.

В согласующем устройстве на основе концентратора магнитного потока используется фокусировка частиц в спадающем магнитном поле. Позитронный пучок в этом устройстве расширяется в магнитном поле, уменьшающемся от максимального значения вблизи конверсионной мишени до минимального в ускоряющей структуре. Преимущество данного устройства заключается в меньшей зависимости его фокусирующих свойств от энергии позитронов. На инжекционном комплексе ВЭПП-5 используется именно этот тип согласующего устройства; его общая схема изображена на рис. 12. Расчет и оптимизация параметров концентратора магнитного потока проводились при помощи численного моделирования [37, 38]. Основными параметрами оптимизации в данном случае являются длина и максимальное магнитное поле в устройстве.

Впервые концентратор магнитного потока был применен для сбора позитронов на стенфордском линейном ускорителе (SLC) [39]. В первых реализациях этого устройства его длина составляла 60–80 см и максимальное поле около 3 Тл [40, 41]. При движении позитронов в таком поле выполняется условие адиабатичности: изменение магнитного поля на шаге ларморовской спирали много меньше величины поля. В связи с этим устройство получило название адиабатического согласующего устройства.

В дальнейшем для фокусировки позитронов ста-

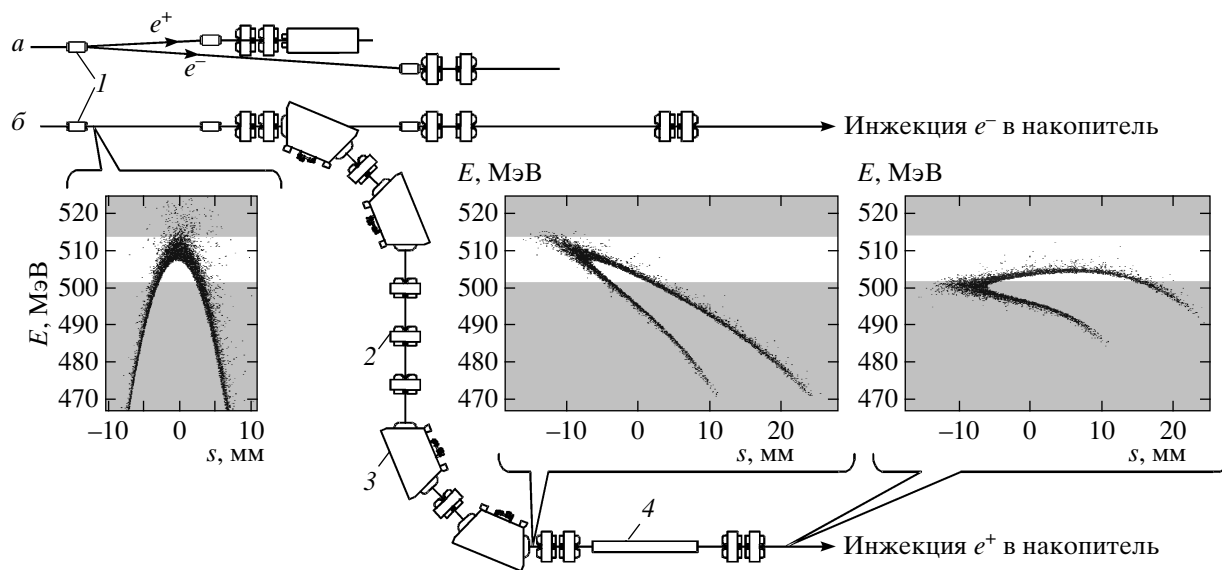


Рис. 22. а) Схема разделения позитронов и электронов перед инъекцией в накопитель-охладитель (вид сбоку). б) Схема дебанчера-монокроматора позитронного пучка (вид сверху): 1 — дипольный магнит, разделяющий электроны и позитроны в вертикальной плоскости, 2 — квадрупольная линза, 3 — поворотный магнит, 4 — ускоряющая структура. На вставках показаны портреты позитронного пучка на плоскости $E-s$ (энергия–продольная координата) в различных точках канала. Белой полосой на графиках обозначен энергетический акцептанс накопителя-охладителя

ли применять более короткие концентраторы потока, так как в них слабее проявляется эффект удлинения пучка за счет разности длин траекторий позитронов. При этом, хотя условие адиабатичности для большинства позитронов уже не выполняется, все равно подобное согласующее устройство часто, по традиции, называют адиабатическим либо квази-адиабатическим.

На рис. 12 изображен концентратор магнитного потока, используемый в позитронном источнике инжекционного комплекса ВЭПП-5. Устройство представляет собой трансформатор, первичной обмоткой которого служит импульсный соленоид, а вторичной — массивный медный корпус с двумя вырезанными полостями. Поскольку длительность импульса составляет 26 мкс, ток течет в тонком скин-слое проводников (толщиной 0.5 мм). Магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, замыкается через верхнюю полость, где за счет конической геометрии удастся получить требуемый продольный профиль магнитного поля. На рис. 13 показаны характерные траектории позитронов в магнитном поле, аппроксимирующем спадающее поле концентратора магнитного потока, применяемого на инжекционном комплексе ВЭПП-5. Позитроны с энергией несколько МэВ, составляющие большую часть спектра, успе-

вают совершить всего 1–2 оборота в этом поле.

При создании концентратора магнитного потока приходится решать три основные проблемы в отношении механики, энергетики и оптики этого импульсного магнита. Проблема механики — результат действия электродинамических сил в элементах магнита, прежде всего, в его токопроводящих узлах. Проблема механического крепления витков обмотки обостряется по причине невозможности применения органической изоляции в условиях интенсивных потоков ионизирующего излучения. Здесь допустимо применение лишь исключительно керамической изоляции, причем только для элементов обмотки, находящихся в слабом поле и в условиях гарантированного отсутствия вибраций, либо их ограничения до допустимой величины, исключая износ пары керамика–металл. Оперативное устранение отмеченного ослабления механических связей практически невозможно, поскольку эти элементы расположены, как правило, в вакууме, причем в интенсивных потоках ионизирующего излучения, поэтому они сильно активированы. Эти обстоятельства могут исключить возможность доступа к этим элементам даже после отключения источника излучения.

Наряду с обеспечением необходимых параметров продольного магнитного поля необходимо свести к

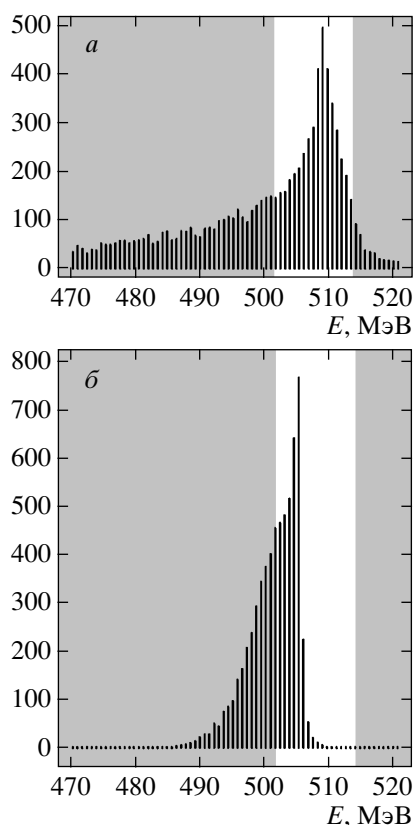


Рис. 23. Расчетный спектр позитронного пучка в конце линейного ускорителя (*а*), после дебанчеромонохроматора (*б*). Белой полосой обозначен энергетический акцептанс накопителя-охладителя

минимуму аксиальную неоднородность этого поля, возникающую, прежде всего, из-за утечки потока из конической полости магнита через принципиально необходимый разрез на краю этой полости. Спадающий профиль магнитного поля (см. рис. 16) внутри конической полости, необходимый для фокусировки позитронов, соответствует резко неравномерному распределению тока по внутренней поверхности конуса. Это приводит к отклонению тока на поверхности разреза от радиального направления, т. е. появлению токов с компонентой, направленной вдоль оси конуса (рис. 14*а*). Для ослабления паразитного влияния этих компонент токов первичная обмотка сделана вдвое длиннее конической полости концентратора (рис. 14*б*). Такое удлинение первичной обмотки позволяет уменьшить негативное влияние продольных компонент поверхностных токов разреза.

На рис. 15 показаны результаты численного моделирования динамики пучка позитронов на расстоянии 75 см после конверсионной мишени.

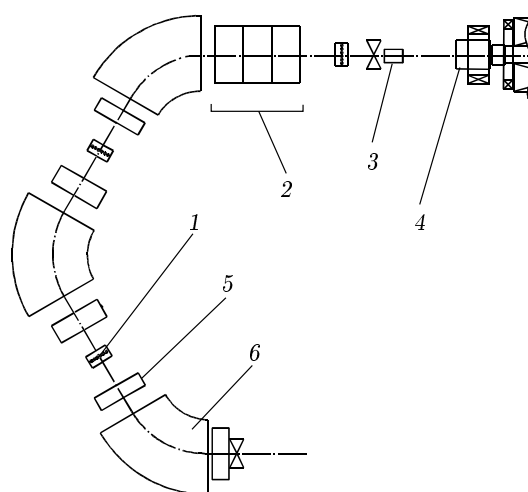


Рис. 24. Изохронный поворот пучка перед конверсионной системой: 1 — люминофор, 2 — фокусирующий триплет, 3 — цилиндр Фарадея, 4 — конверсионная система, 5 — линза, 6 — поворотный магнит. Квадрупольная линза 5 выключается во время измерения энергии электронного пучка

Основные параметры концентратора магнитного потока следующие: максимальное значение магнитного поля — 10 Тл, общий ток конической полости магнита — 120 кА, максимальное напряжение емкостного накопителя — 1.2 кВ, энергоемкость емкостного накопителя — 90 Дж, длительность импульса тока — 26 мкс, частота работы — 50 Гц, средняя потребляемая мощность — 4 кВт.

Стендовые испытания концентратора магнитного потока

После разработки и изготовления импульсного магнита были проведены его стендовые испытания на штатном импульсном генераторе. Магнитные измерения проводились с помощью индуктивного датчика, снабженного RC-интегратором [42]. На рис. 16 представлено распределение продольного и поперечного магнитных полей в конусе магнита. Магнит проработал на стенде около 10^7 циклов без каких-либо повреждений или изменений его параметров, что свидетельствует об отсутствии проблем, связанных с механикой импульсного устройства.

Конверсионная мишень, помещенная в сильное импульсное магнитное поле, заметно нагревается, однако предусмотренное конструкцией держателя мишени охлаждение обеспечивает нагрев торца мишени не более чем на 100 °С. Возмущение магнитного поля на торце такой «полупрозрачной» (толщина

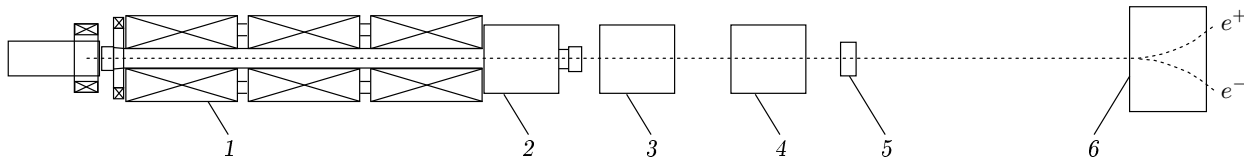


Рис. 25. Установка, использованная для измерения коэффициента захвата позитронов: 1 — соленоид конверсионной системы, 2, 3, 4 — квадрупольные линзы, 5 — корректор положения пучка, 6 — магнит-сепаратор

скин-слоя около 1 мм) для импульсного магнитного поля мишени также оказалось незначительным. За счет данного эффекта величина импульсного поля снижается лишь на 2–3 % на расстоянии 1 мм от торца мишени.

Важно отметить необходимость точного совмещения магнитной оси импульсного согласующего устройства и магнитных осей соленоидов постоянного тока с осью первой ускоряющей секции линейного ускорителя позитронов. Разработанная конструкция всей системы магнитной фокусировки источника позитронов имеет все необходимое для такого совмещения.

3.4. Квадрупольная фокусировка позитронов

Квадрупольная фокусировка экономически более выгодна, чем соленоидальная, так как не требует создания магнитного поля во всем объеме вакуумной камеры. При этом пучок, фокусируемый квадрупольными линзами, должен быть достаточно монохроматичным. Квадрупольная фокусировка обычно применяется в позитронных источниках при наборе пучком средней энергии около 100 МэВ, когда его энергетический разброс уменьшается до 20 %.

Перейти к фокусировке квадрупольными линзами без потерь частиц можно только в том случае, если аксептанс квадрупольного канала соответствует эмиттансу пучка на выходе соленоида. Аксептанс квадрупольного канала можно оценить как

$$A \approx \frac{r^2}{L_q} P, \quad (4)$$

где r — радиус апертуры вакуумной камеры, L_q — расстояние между центрами квадрупольных линз, P — средний импульс позитронов. Под аксептансом мы понимаем здесь фазовую площадь в координатах (x, P_x) или (y, P_y) . Эта оценка близка к точному значению в случае, когда изменение энергии позитронов между двумя линзами мало по сравнению с их энергией на выходе соленоида.

Через соленоид смогут пройти позитроны, поперечный импульс которых не больше величины

$$P_{t,max} = reB_s, \quad (5)$$

где e — заряд позитрона, B_s — магнитное поле в соленоиде. Для параметров инжекционного комплекса $P_{t,max} \approx 1.5$ МэВ/с. Область фазовой плоскости (x, P_x) , доступная для ускорения частиц внутри длинного соленоида, ограничена эллипсом площадью

$$A_s = \pi r P_{t,max}. \quad (6)$$

Степень заполненности этого эллипса позитронами зависит от параметров согласующего устройства. На рис. 17 показано распределение позитронов на плоскости (x, P_x) , соответствующее параметрам инжекционного комплекса ВЭПП-5. Согласно рис. 17, пучок в конце соленоида занимает всю доступную апертуру; при этом по оси импульсов распределение частиц в два раза уже доступного интервала от $-P_{t,max}$ до $P_{t,max}$ (см. рис. 18).

Из распределений, приведенных на рис. 17, 18, следует, что 90 % позитронов занимают на фазовой плоскости вдвое меньшую площадь, чем рассчитано по выражению (6). Таким образом, уравнение для энергии перехода от соленоидальной к квадрупольной фокусировке, при которой потери позитронов меньше 10 %, выглядит следующим образом:

$$\frac{r^2}{L_q} \approx \frac{\pi}{2} \frac{r P_{t,max}}{E_{tr}/c}, \quad (7)$$

где E_{tr} — энергия перехода. Отсюда получаем

$$E_{tr} \approx \frac{\pi}{2} \frac{L_q}{r} c P_{t,max} = \frac{\pi}{2} B_s L_q e c. \quad (8)$$

На инжекционном комплексе ВЭПП-5 расстояние между линзами, расположенными на ускоряющих секциях, $L_q = 1.7$ м (см. рис. 19), поле в соленоиде $B_s = 0.5$ Тл; следовательно, $E_{tr} \approx 400$ МэВ. В настоящее время на инжекционном комплексе $E_{tr} \approx 70$ МэВ, в связи с чем неизбежны большие потери позитронов (около 2/3 от числа прошедших через соленоид). В будущем планируется увеличить длину соленоида конверсионной системы, а также

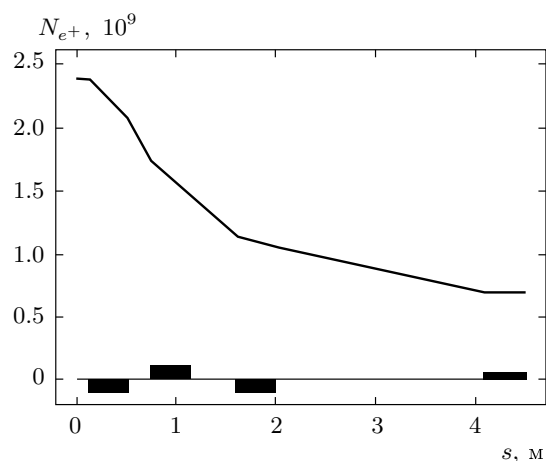


Рис. 26. Количество позитронов в зависимости от положения пучка вдоль вакуумного канала между соленоидом конверсионной системы и магнитом-сепаратором

установить дополнительные квадрупольные линзы, что должно повысить захват позитронов приблизительно в 2 раза.

На рис. 20 показаны минимальные размеры позитронного пучка, которые способна обеспечить квадрупольная фокусировка в позитронном ускорителе инжекционного комплекса (если отсутствовало бы ограничение по апертуре вакуумной камеры). Расчеты сделаны с помощью программы ELEGANT [43]. В нижней части графика прямоугольниками обозначены квадрупольные линзы. Как видно из рис. 20, поперечный размер пучка становится меньше его исходного размера в соленоиде только в конце линейного ускорителя, где энергия позитронов больше 400 МэВ, что соответствует сделанным ранее оценкам.

На рис. 21 показано, как число позитронов уменьшается с движением пучка вдоль ускорителя из-за потерь позитронов на стенках вакуумной камеры. Данное моделирование выполнено для существующей системы магнитной фокусировки.

3.5. Инжекция позитронного пучка в накопитель-охладитель

Особенностью накопителя-охладителя, как и многих циклических ускорителей, является его относительно малый энергетический акцептанс, т. е. предельно допустимый энергетический разброс в инжектируемом пучке. Для накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 допустимое

отклонение энергии частицы от равновесной составляет $\Delta E/E_0 = \pm 0.012$.

Энергетический разброс позитронного пучка, приобретаемый им в конце линейного ускорителя, определяется соотношением длины пучка и длины волны ускоряющего ВЧ-поля. Этот энергетический разброс значительно больше предельно допустимого разброса для накопителя, поэтому на многих установках перед инжекцией позитронов в накопитель применяется дополнительное согласующее устройство — дебанчер-монохроматор. Это устройство осуществляет «поворот» позитронного пучка в плоскости $E-s$ (энергия – продольная координата), уменьшая таким образом энергетический разброс за счет увеличения продольного размера пучка.

На рис. 22 показана схема работы дебанчера-монохроматора на инжекционном комплексе ВЭПП-5. Позитроны предполагается направлять в накопитель по каналу, состоящему из четырех 45-градусных поворотных магнитов. Частицы, имеющие большую энергию, движутся в поле поворотных магнитов по большему радиусу и оказываются в хвосте пучка. Соответственно, частицы с меньшей энергией оказываются в головной части пучка. Энергетический разброс в упорядоченном таким образом пучке можно частично уменьшить, пропустив пучок через ускоряющую структуру вблизи нулевой фазы электрического поля. На рис. 23 показаны расчетные спектры позитронного пучка до и после дебанчера-монохроматора.

Расчеты показывают, что использование дебанчера-монохроматора на инжекционном комплексе ВЭПП-5 позволит в полтора раза увеличить число захваченных в накопитель позитронов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА ПОЗИТРОНОВ

Для определения коэффициента захвата позитронов были проведены измерения всех трех входящих в формулу (3) величин.

Измерение заряда электронного пучка перед конверсионной мишенью проводилось при помощи цилиндра Фарадея. Цилиндр Фарадея изготовлен из вольфрама, его длина 70 мм, ширина и высота по 20 мм. Моделирование с помощью программы GEANT [6] показывает, что поглощение заряда в цилиндре составляет 94 % (цилиндр полного поглощения не удалось использовать из-за недостатка свободного места). Для запираания тока вторичной элек-

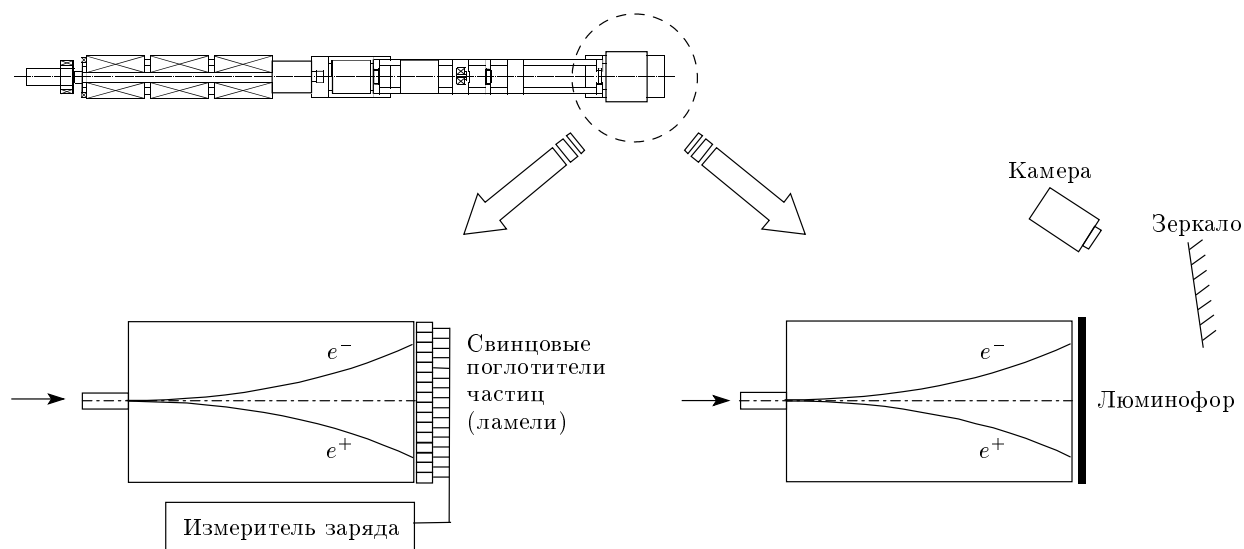


Рис. 27. Системы регистрации частиц

тронной эмиссии с поверхности цилиндра на него подается положительное относительно вакуумной камеры напряжение величиной 300 В. По осциллограмме тока, стекающего с цилиндра Фарадея, вычислялся заряд первичного электронного пучка.

Энергия электронов измерялась после поворотного магнита по положению пучка на выдвигном люминофоре (см. рис. 24).

Чтобы измерить количество позитронов, производимых конверсионной системой, необходимо отделить позитроны от электронов, ускорившихся в соседних фазах бегущей волны ВЧ-структуры. Для этого использовался прямоугольный дипольный магнит (магнит-сепаратор на рис. 25).

Между соленоидом конверсионной системы и магнитом-сепаратором для фокусировки пучка размещены три квадрупольные линзы. На рис. 26 показаны результаты расчета потерь позитронов на стенке вакуумного канала между соленоидом конверсионной системы и магнитом-сепаратором.

Моделирование с помощью программы ELEGANT показало, что при оптимальных значениях градиента магнитного поля в линзах через используемый для измерений канал может пройти не более 80 % позитронов от числа ускоренных в полностью собранном позитронном ускорителе (рис. 26). Таким образом, проведенные измерения заряда позитронного пучка после магнита-сепаратора не должны давать необоснованно завышенную оценку для коэффициента захвата позитронов в полностью собранном линейном ускорителе.

Для измерения заряда и средней энергии позитронного пучка после дипольного магнита-сепаратора устанавливался секционированный приемник, состоящий из 16 свинцовых секций (ламелей) шириной 10 мм, длиной 50 мм (рис. 27). Секции изолированы друг от друга стеклотекстолитом. Падающий пучок полностью поглощается в приемнике. Измерение заряда, попавшего на ламели, проводится блоком, представляющим собой 32 зарядочувствительных усилителя [44], поочередно коммутируемых на АЦП. Измерение проводилось с каждой ламели отдельно, затем заряд пучка суммировался. На рис. 28 показаны зависимости числа позитронов от максимума поля в согласующем устройстве при разных энергиях падающего на мишень первичного электронного пучка.

При энергии электронов 265 МэВ количество позитронов, зарегистрированных после магнита сепаратора, составляет $5 \cdot 10^8$. Число электронов перед мишенью, измеренное с помощью цилиндра Фарадея, равно $1.8 \cdot 10^{10}$. Таким образом, коэффициент захвата (3) для данной системы $Y \approx 0.1 \text{ ГэВ}^{-1}$.

Для измерения распределения частиц в поперечном сечении пучка после магнита-сепаратора вместо свинцовых поглотителей был установлен люминофор. Вспышка света на люминофоре, вызванная попаданием на него как электронов, так и позитронов, регистрировалась с помощью ПЗС-камеры, синхронизированной с работой ускорителя. На рис. 29 показано изображение, регистрируемое камерой. Люминофорное покрытие было однородно нанесено на

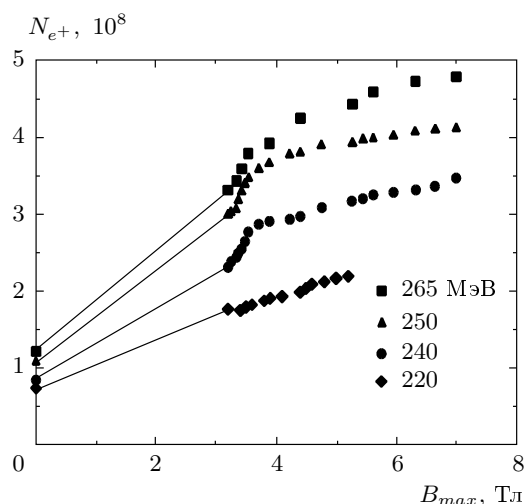


Рис. 28. Зависимости числа ускоренных позитронов от величины магнитного поля концентратора для разных энергий первичного электронного пучка

стеклянный диск диаметром 34 мм. Диск был размещен перпендикулярно первоначальному (перед разводящим магнитом) направлению движения пучков. Люминофор и свинцовые поглотители находились в атмосфере в 10 мм от тонкого (0.1 мм) окна из нержавеющей стали, разделяющего атмосферу и вакуум ускорителя. Оценка среднего смещения частиц за счет их многократного рассеяния на 0.1 мм нержавеющей стали и 10 мм воздуха дает величину 2 мм. Из рис. 29 видно, что поперечный размер позитронного пучка сравним с поперечным размером вакуумной камеры (20 мм) и многократное рассеяние на выпускном окне и воздушном зазоре перед люминофором незначительно искажает исходное распределение частиц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5 показали, что данная установка способна производить за один импульс до $5 \cdot 10^8$ позитронов. Потери позитронов при инжекции в накопитель-охладитель согласно расчетам должны составить приблизительно половину от этого числа. Поэтому можно ожидать, что общая производительность инжекционного комплекса при частоте работы линейных ускорителей 50 Гц достигнет 10^{10} позитронов в секунду.

Основным преимуществом инжекционного ком-

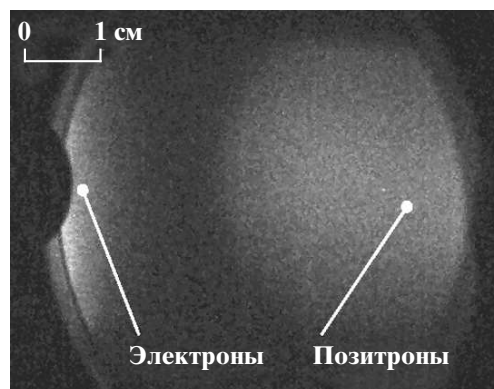


Рис. 29. Изображение на люминофоре

плекса ВЭПП-5 перед аналогичными установками, как видно из табл. 1, является согласующее устройство улучшенной конструкции, в котором удалось достичь оптимальной для фокусировки позитронов величины магнитного поля, сохранив аксиальную симметрию этого поля. К недостаткам следует отнести малую длину соленоида, обеспечивающего фокусировку позитронов в начале ускорителя, а также малое количество квадрупольных линз, благодаря чему неизбежны потери позитронов при пролете пучка в переходной области между соленоидальной и квадрупольной фокусировкой. Еще одним конструктивным недостатком позитронной системы является отсутствие системы, отделяющей позитроны от электронов в начале ускорителя (после соленоида). Сгусток электронов, отстающий от позитронов на половину длины волны ускоряющего поля, в данном случае будет двигаться сквозь весь ускоритель вплоть до накопителя-охладителя, затрудняя настройку установки. Магниты, сепарирующие электроны, на инжекционном комплексе не применяются из-за экономии места под линейный ускоритель позитронов.

Повышение производительности комплекса в будущем возможно в нескольких направлениях: за счет улучшения магнитной фокусировки позитронов, увеличения интенсивности и энергии первичного электронного пучка. Удлинение соленоида конверсионной системы, а также установка дополнительных квадрупольных линз на ускоряющих секциях способны уменьшить потери позитронов после соленоида (см. рис. 21) и увеличить захват позитронов в 2–3 раза. Благодаря использованию более совершенного источника электронов интенсивность падающего на мишень пучка можно увеличить приблизительно в 3 раза,

до $6 \cdot 10^{10}$. Дальнейшее увеличение интенсивности электронного пучка ограничено эффектами искажения ВЧ-поля под действием электромагнитных полей, излученных пучком в ускоряющую структуру. Кроме того, есть возможность в 1.5 раза поднять энергию электронного пучка, установив дополнительные ускоряющие структуры. Таким образом, предельно возможная производительность инжекционного комплекса ВЭПП-5 находится в интервале $(1-2) \cdot 10^{11}$ позитронов в секунду.

Авторы признательны Д. В. Пестрикову, В. В. Петрову и Г. М. Тумайкину за ценные комментарии и замечания, которые способствовали существенному улучшению качества изложения материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Chao and M. Tigner, *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, World Sci., Singapore (1999).
2. R. Chehab, in *Proc. CERN Accelerator School, Fifth General Accelerator Physics Course*, Geneva (1994), Vol. II, p. 643.
3. H.-H. Braun, *Positrons for Accelerators*, Ph. D. Thesis, Zurich Univ. (1992).
4. D. Yount and J. Pine, *Nucl. Instr. Meth.* **15**, 45 (1962).
5. C. Leroy and P.-G. Rancoita, *Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection*, World Sci. (2004), p. 197.
6. <http://cern.ch/geant4>.
7. R. Pitthan, H. Braun, J. E. Clendenin et al., in *Proc. 14th Particle Accelerator Conf.*, San Francisco, USA (1991), p. 2098.
8. J. E. Clendenin, in *Proc. 13th Particle Accelerator Conf.*, Chicago, USA (1989), p. 1107; Preprint SLAC-PUB-4743.
9. P. Krejcik, J. Corbett, S. Ecklund et al., in *Proc. 3rd Europ. Particle Accelerator Conf.*, Berlin, Germany (1992), p. 537; Preprint SLAC-PUB-5786.
10. I. Abe, N. Akasaka, M. Akemoto et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **499**, 167 (2003).
11. T. Kamitani, in *Proc. 8th Europ. Particle Accelerator Conf.*, Paris, France (1992), p. 1088.
12. F. Sannibale, M. Vescovi, R. Boni et al., *DAΦNE Linac Commissioning Results*, DAΦNE Technical Note BM-2 (1997).
13. R. Boni, F. Marcellini, F. Sannibale et al., in *Proc. 6th Europ. Particle Accelerator Conf.*, Stockholm, Sweden (1998), p. 764.
14. M. E. Biagini, C. Biscari, R. Boni et al., in *Proc. 1st Asian Particle Accelerator Conf.*, KEK, Tsukuba, Japan (1998), p. 415.
15. X. Yu, Y. Chen, X. Wang, and M. Liu, in *Proc. 3rd Asian Particle Accelerator Conf.*, Gyeongju, Korea (2004).
16. G.X. Pei for linac group, in *Proc. 21st Int. Linac Conf.*, Gyeongju, Korea (2002), p. 49.
17. J. Clendenin, L. Rinolfi, K. Takata, and D. J. Warner, in *Proc. 18th Int. Linac Conf.*, Geneva, Switzerland (1996).
18. A. Frebel and G. Hemmie, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* (1979), Vol. NS-26, № 3.
19. C. Bourat, H. Braun, and L. Rinolfi, in *Proc. 4th Europ. Particle Accelerator Conf.*, London, England (1994), p. 704.
20. S. Henderson, G. Codner, M. Forster et al., in *Proc. 19th Particle Accelerator Conf.*, Chicago, USA (2001), p. 3505.
21. Г. И. Будкер, В. Л. Ауслендер, В. Н. Байер и др., в сб. *Труды Междунар. конф. по ускорителям заряженных частиц*, Дубна (1963), Атомиздат, Москва (1964), с. 274.
22. В. Л. Ауслендер, Т. А. Всеволожская, Л. Л. Данилов и др., в сб. *Атомная энергия*, Атомиздат, Москва (1967), т. 22, вып. 3, с. 206.
23. Б. Ф. Баянов, Г. И. Сильвестров, *ЖТФ* **48**, 160 (1978).
24. Т. А. Всеволожская, Л. Л. Данилов, Г. И. Кулипанов и др., *Препринт ИЯФ № 76-94* (1976).
25. VEPP-4 staff, in *Proc. 12th Int. Conf. High Energy Accelerators*, Batavia, USA (1983), p. 179.
26. A. N. Skrinsky, in *Proc. 12th Int. Conf. High Energy Accelerators*, Batavia, USA (1983), p. 104.
27. Г. И. Сильвестров, в сб. *Труды XIII Междунар. конф. по ускорителям*, Новосибирск (1986), Наука, Новосибирск (1987), с. 164.
28. Т. А. Всеволожская, А. А. Михайличенко, Е. А. Переведенцев и др., *Препринт ИЯФ № 86-129* (1986).
29. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, *Теория циклических ускорителей*, Физматлит, Москва (1962), с. 197.

30. M. Sands, *The Physics of Electron Storage Rings. An Introduction*, SLAC (1979), p. 123.
31. Г. Брук, *Циклические ускорители заряженных частиц*, Атомиздат, Москва (1970), с. 231.
32. T. Wangler, *Principles of RF Linear Accelerators*, J. Wiley & Sons, New York (1998), p. 8.
33. Э. Л. Бурштейн, Г. В. Воскресенский, *Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками*, Атомиздат, Москва (1970), с. 8.
34. S. Ecklund, Preprint SLAC-CN-128 (1981).
35. Р. М. Лапик, П. В. Мартышкин, С. В. Шиянков, А. М. Якутин, Препринт ИЯФ № 2005-50 (2005).
36. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика*, т. 1, Наука, Москва (1988), с. 188.
37. A. A. Kulakov and P. V. Martyshkin, in *Proc. 5th Europ. Particle Accelerator Conf.*, Barcelona, Spain (1996), p. 1466.
38. R. M. Lapik and P. V. Martyshkin, in *Proc. 19th Particle Accelerator Conf.*, Chicago, USA (2001), p. 2404.
39. R. H. Helm, Preprint SLAC-4 (1962).
40. *The Stanford Two-miles Accelerator*, ed. by R. B. Nearl, W. A. Benjamin, New York–Amsterdam (1968).
41. R. Chehab, G. L. Meur, B. Mouton, and M. Renard, Preprint LAL/RT/83-03 (1983).
42. Г. Кнопфель, *Сверхсильные импульсные магнитные поля*, Мир, Москва (1972), с. 177.
43. M. Borland, Preprint Advanced Photon Source LS-287 (2000).
44. К. Группен, *Детекторы элементарных частиц*, Новосибирск (1999), с. 270.