

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов, А.М. Батраков, Е.А. Бехтенов, В.Е. Блинов,
А.В. Богомягков, А.Е. Бондарь, Д.Б. Буренков, С.П. Васичев, В.Ф. Веремеенко, С.А. Глухов,
Ю.М. Глуховченко, О.П. Гордеев, В.Н. Ерохов, В.Н. Жилич, А.И. Жмака, А.Н. Журавлев,
Э.И. Зинин, В.В. Каминский, В.И. Каплин, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселев,
В.Р. Козак, Г.И. Кузнецов, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, Г.Я. Куркин, Е.Б. Левичев,
В.Р. Мамкин, А.С. Медведко, О.И. Мешков, А.И. Михайлов, Л.А. Мироненко,
С.И. Мишнев, И.И. Морозов, Н.Ю. Мучной, В.В. Нейфельд, С.А. Никитин, И.Б. Николаев,
Д.М. Николенко, В.К. Овчар, И.Н. Окунев, А.П. Онучин, В.В. Орешонок, В.Н. Осипов,
В.В. Петров, В.М. Петров, П.А. Пиминов, О.А. Плотникова, А.В. Полянский, Ю.А. Пупков,
В.В. Репков, Е.А. Ротов, В.К. Сандырев, В.В. Свищев, И.К. Седяров, А.Н. Селиванов,
Е.А. Симонов, С.В. Синяткин, А.Н. Скринский, В.В. Смалюк, Е.В. Старостина,
Д.П. Суханов, С.В. Тарарышкин, Ю.А. Тихонов, Д.К. Топорков, Г.М. Тумайкин,
И.Ф. Утюпин, М.Г. Федотов, А.Д. Хильченко, В.М. Цуканов, В.П. Черепанов, И.Н. Чуркин,
А.Г. Шамо́в, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов, С.В. Шиянков, Е.И. Шубин

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-4

ИЯФ 2011-20

НОВОСИБИРСК

2011

Содержание

1	Введение	5
2	История	9
3	Важнейшие результаты	13
3.1	Физика высоких энергий	13
3.2	Синхротронное излучение	14
3.3	Ядерная физика	15
4	Инжектор «Позитрон»	17
4.1	Общее описание	17
4.2	Ускоритель электронов ЭЛИТ	18
4.3	Импульсный гирокон	21
4.4	Линейный ускоритель	22
4.5	Конверсионная система	24
4.6	Система транспортировки пучка из ЛУ в синхротрон	25
4.7	Синхротрон Б-4	27
4.8	Модернизация инжектора «Позитрон»	32
5	Накопитель ВЭПП-3	34
5.1	Описание и параметры	34
5.2	Магнитная система	36
5.3	Ускоряющая ВЧ система	39
5.4	Вакуумная система	40
5.5	Диагностика пучка	42
6	Транспортировка пучков и системы впуска-выпуска	43
6.1	Инжекция, транспортировка и выпуск пучков	43
6.2	Устройства впуска-выпуска	48
7	Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М	50
7.1	Основные параметры	50
7.2	Светимость	51
7.3	Магнитная система	54
7.4	Ускоряющая ВЧ система	60
7.5	Вакуумная система	63
7.6	Система электростатического разведения пучков	64
7.7	Геодезический мониторинг	66
7.8	Системы обратной связи	67
8	Измерение энергии пучка	74
8.1	Метод резонансной деполяризации	74
8.2	Метод обратного комптоновского рассеяния	78

9	Управление и автоматизация	83
9.1	Система управления	83
9.2	База данных параметров ВЭПП-4	87
9.3	Автоматизация работы комплекса	88
10	Диагностика пучка	91
10.1	Системы датчиков положения пучка	91
10.2	Измерение тока пучка	95
10.3	Оптическая диагностика пучка	95
11	Системы измерения и стабилизации температуры	103
12	Исследования динамики пучка	107
12.1	Эксперименты с поляризованными пучками	107
12.2	Скорость счета тушековских электронов в зависимости от энергии	110
12.3	Методы измерения энергетического разброса пучка	112
12.4	Измерение динамической апертуры	114
12.5	Исследование динамики пучка при пересечении бетатронного резонанса	116
12.6	Измерение импедансов связи	119
	Заключение	125
	Список литературы	127

Ускорительный комплекс ВЭПП-4

А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов, А.М. Батраков, Е.А. Бехтенов, В.Е. Блинов, А.В. Богомягков, А.Е. Бондарь, Д.Б. Буренков, С.П. Васичев, В.Ф. Веремеенко, С.А. Глухов, Ю.М. Глуховченко, О.П. Гордеев, В.Н. Ерохов, В.Н. Жилич, А.И. Жмака, А.Н. Журавлев, Э.И. Зинин, В.В. Каминский, В.И. Каплин, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселев, В.Р. Козак, Г.И. Кузнецов, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, Г.Я. Куркин, Е.Б. Левичев, В.Р. Мамкин, А.С. Медведко, О.И. Мешков, А.И. Микайылов, Л.А. Мироненко, С.И. Мишнев, И.И. Морозов, Н.Ю. Мучной, В.В. Нейфельд, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, Д.М. Николенко, В.К. Овчар, И.Н. Окунев, А.П. Онучин, В.В. Орешонок, В.Н. Осипов, В.В. Петров, В.М. Петров, П.А. Пиминов, О.А. Плотникова, А.В. Полянский, Ю.А. Пупков, В.В. Репков, Е.А. Ротов, В.К. Сандырев, В.В. Свищев, И.К. Седяров, А.Н. Селиванов, Е.А. Симонов, С.В. Синяткин, А.Н. Скринский, В.В. Смалюк, Е.В. Старостина, Д.П. Суханов, С.В. Тарарышкин, Ю.А. Тихонов, Д.К. Топорков, Г.М. Тумайкин, И.Ф. Утюпин, М.Г. Федотов, А.Д. Хильченко, В.М. Цуканов, В.П. Черепанов, И.Н. Чуркин, А.Г. Шамоу, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов, С.В. Шиянков, Е.И. Шубин

Аннотация

Ускорительный комплекс ВЭПП-4 представляет собой уникальную установку, основное назначение которой — проведение экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками. Комплекс ВЭПП-4 включает в себя инжектор, промежуточный накопитель ВЭПП-3 и электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М с детектором КЕДР. В последние годы программа работ по физике высоких энергий на комплексе сосредоточена на прецизионном измерении масс элементарных частиц, с рекордной точностью определены массы таких частиц, как J/ψ , $\psi(2s)$ и $\psi(3770)$ мезоны, τ -лептон. Массы J/ψ и $\psi(2s)$ мезонов, полученные на ВЭПП-4М, входят в десятку наиболее точно известных масс элементарных частиц, измеренных за всю историю физики. В 2008 году закончен эксперимент по измерению массы τ -лептона с лучшей в мире точностью. Кроме физики высоких энергий на комплексе ВЭПП-4 проводятся исследования с использованием выведенных пучков синхротронного излучения. Основные направления — материаловедение, изучение взрывных процессов, археология, биология и медицина, нанотехнологии и т.д. На накопителе ВЭПП-3 проводятся также эксперименты по ядерной физике на внутренней газовой мишени, которая представляет собой рекордную по интенсивности струю газа, впускаемую непосредственно в вакуумную камеру накопителя. Эксперименты с поляризованной газовой мишенью дают уникальную информацию о структуре и свойствах протона. На установках комплекса проводятся актуальные исследования динамики пучков заряженных частиц. В статье описывается устройство комплекса ВЭПП-4 и аспекты его работы, относящиеся к физике и технике ускорителей заряженных частиц, за период 2000–2010 гг.

VEPP-4 Accelerator Facility

A.N. Aleshaev, V.V. Anashin, O.V. Anchugov, A.M. Batrakov, E.A. Bekhtenev,
V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, A.E. Bondar, D.B. Burenkov, S.P. Vasichev,
V.F. Veremeyenko, S.A. Glukhov, Yu.M. Glukhovchenko, O.P. Gordeev,
V.N. Erokhov, V.N. Zhilich, A.I. Zhmaka, A.N. Zhuravlev, E.I. Zinin,
V.V. Kaminskiy, V.I. Kaplin, S.E. Karnaev, G.V. Karpov, V.A. Kiselev, V.R. Kozak,
G.I. Kuznetsov, G.N. Kulipanov, E.A. Kuper, G.Ya. Kurkin, E.B. Levichev,
V.R. Mamkin, A.S. Medvedko, O.I. Meshkov, A.I. Mikayilov, L.A. Mironenko,
S.I. Mishnev, I.I. Morozov, N.Yu. Muchnoi, V.V. Neufeld, S.A. Nikitin, I.B. Nikolaev,
D.M. Nikolenko, V.K. Ovchar, I.N. Okunev, A.P. Onuchin, V.V. Oreshonok,
V.N. Osipov, V.V. Petrov, V.M. Petrov, P.A. Piminov, O.A. Plotnikova,
A.V. Polyansky, Yu.A. Pupkov, V.V. Repkov, E.A. Rotov, V.K. Sandyrev,
V.V. Svischev, I.K. Sedlyarov, A.N. Selivanov, E.A. Simonov, S.V. Sinyatkin,
A.N. Skrinsky, V.V. Smaluk, E.V. Starostina, D.P. Sukhanov, S.V. Tararyshkin,
Yu.A. Tikhonov, D.K. Toporkov, G.M. Tumaikin, I.F. Utyupin, M.G. Fedotov,
A.D. Khilchenko, V.M. Tsukanov, V.P. Cherepanov, I.N. Churkin, A.G. Shamov,
D.N. Shatilov, D.A. Shvedov, S.V. Shiyankov, E.I. Shubin

Abstract

The VEPP-4 accelerating-storage facility is designed for high-energy physics experiments, mainly for the particle mass measurements with extremely high precision. Masses of J/ψ , $\psi(2s)$, $\psi(3770)$ mesons and τ -lepton have been measured with the world-best accuracy at the VEPP-4M electron-positron collider with the KEDR detector. Masses of J/ψ and $\psi(2s)$ mesons are among 10 most precisely known particles masses. In addition to high-energy physics, nuclear physics experiments are carried out at the VEPP-3 storage ring using a record-intensity internal polarized gas target. Scientific researches and development of new technologies are carried out using synchrotron radiation from the VEPP-3 and VEPP-4M storage rings. The main subjects are: materials technology, paleoclimate investigations, archaeology, biomedicine, nanotechnology, etc. Topical investigations on beam dynamics and accelerator physics are performed at the VEPP-4. In the article, the structure and performance of the VEPP-4 facility are described, as well as accelerator physics issues of its operation during 2000–2010.

1 Введение

Ускорительный комплекс ВЭПП-4 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН предназначен для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками высоких энергий, экспериментов по ядерной физике и исследований с использованием синхротронного излучения. Комплекс ВЭПП-4 (рис. 1.1) включает в себя линейный ускоритель (энергия пучка — до 50 МэВ), бустерный синхротрон Б-4 (350 МэВ), накопитель ВЭПП-3 (до 2 ГэВ) и коллайдер ВЭПП-4М, а также универсальный детектор КЕДР [1] с магнитным полем до 1 Тл в объеме 21.6 м³, создаваемым сверхпроводящим соленоидом, и другое оборудование, необходимое для выполнения различных экспериментальных программ.

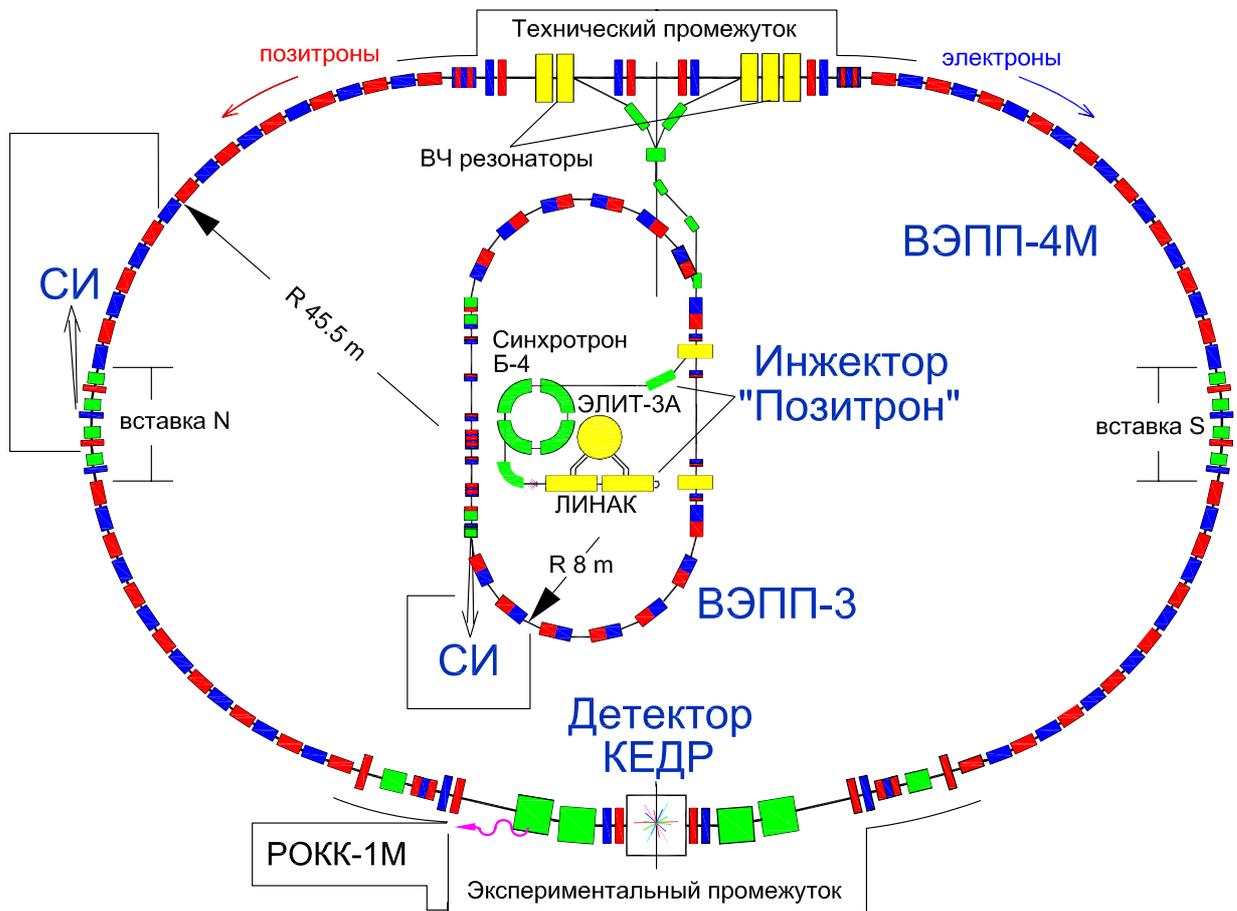


Рис. 1.1: Схема ускорительного комплекса ВЭПП-4.

Основное назначение коллайдера ВЭПП-4М — экспериментальное исследование свойств элементарных частиц, параметров резонансных состояний и сечений процессов электрон-позитронной аннигиляции. Несмотря на невысокую, по сравнению с современными коллайдерами, светимость, ВЭПП-4М с детектором КЕДР обладает рядом преимуществ, позволяющих проводить уникальные исследования по физике высоких энергий, включая:

- уникальный диапазон энергий от 0.9 ГэВ до 5.5 ГэВ в пучке;
- возможность измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации с рекордной относительной точностью 10^{-6} ;

- возможность непрерывного мониторинга энергии пучка с относительной точностью $5 \cdot 10^{-5}$ и энергетического разброса с точностью 10% по измерению положения края комптоновского спектра обратно-рассеянных монохроматических лазерных фотонов;
- наличие универсального магнитного детектора КЕДР, по параметрам сравнимого с другими современными детекторами для экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах;
- наличие системы регистрации электронов, рассеянных при взаимодействии двух пучков, с высоким импульсным разрешением 2γ -состояния (около 10^{-3}), позволяющей проводить уникальные исследования двухфотонных процессов.

Система измерения энергии частиц методом резонансной деполяризации и отработанная процедура восстановления энергии между калибровками с использованием измеряемых параметров ВЭПП-4М позволяет определять массу элементарных частиц с чрезвычайно высокой точностью (до 10^{-6}). В экспериментах, проводившихся на e^+e^- коллайдере ВЭПП-4М с 2000 года, с рекордной точностью измерены массы J/ψ , $\psi(2s)$ и $\psi(3770)$ -мезонов, а также масса τ -лептона. Массы J/ψ - и $\psi(2s)$ -мезонов, измеренные на ВЭПП-4М с точностью в 3 – 7 раз лучше среднемировой, входят в десятку наиболее точно известных масс элементарных частиц за всю историю физики. В настоящее время точнее измерены только массы электрона, протона, нейтрона, мюона и π^\pm -мезона. В 2008 году закончен эксперимент по измерению массы τ -лептона, внесший значительный вклад в определение пределов применимости «стандартной модели» — теории, которая на сегодняшний день наиболее полно описывает фундаментальные свойства материи и элементарных частиц.

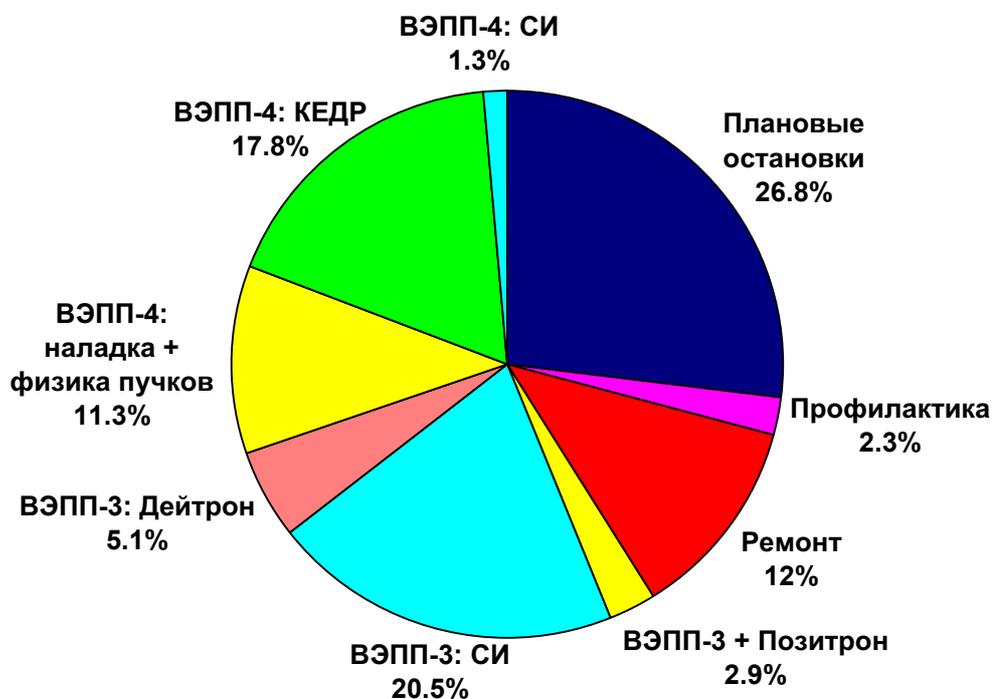


Рис. 1.2: Распределение рабочего времени комплекса ВЭПП-4 за 2000–2010 гг.

Кроме экспериментов по физике высоких энергий, на ВЭПП-3 и ВЭПП-4М проводятся исследования с использованием выведенных пучков синхротронного излучения.

Основные направления — материаловедение, изучение взрывных процессов, археология, биология и медицина, нанотехнологии и т.д. На накопителе ВЭПП-3 проводятся эксперименты по ядерной физике на внутренней газовой мишени, которая представляет собой рекордную по интенсивности струю газа (дейтерия или водорода), впускаемую непосредственно в вакуумную камеру накопителя. Работы по ядерной физике с поляризованной газовой мишенью дают уникальную информацию о структуре и свойствах протона. Регулярно проводятся эксперименты по малоизученным вопросам физики пучков в электрон-позитронных накопителях.

На рис. 1.2 показано распределение времени по различным видам работ на комплексе ВЭПП-4 за 2000–2010 годы. Как видно на рисунке, рабочее время комплекса распределено главным образом между экспериментами по физике высоких энергий с детектором КЕДР (17.8%) и экспериментами с использованием синхротронного излучения (20.5% ВЭПП-3 + 1.3% ВЭПП-4М). Рабочее время, выделяемое на исследования физики пучков и ускорителей (11.3%), необходимо как для поддержания установок в рабочем режиме, требуемом для экспериментов, так и для исследования актуальных вопросов физики пучков. Регулярные профилактические работы (2.3%) выполняются еженедельно. Потери времени за счет неисправностей и ремонта (12%) обусловлены многочисленностью, сложностью и износом оборудования, большая часть которого эксплуатируется десятки лет.

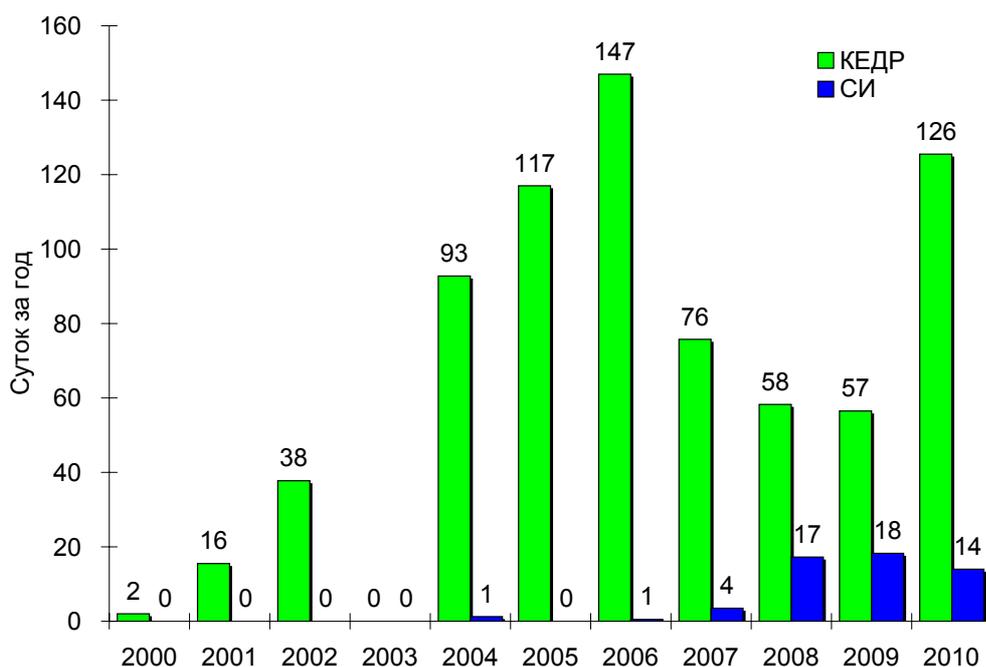


Рис. 1.3: Эксперименты на ВЭПП-4М.

На рис. 1.3 показано распределение рабочего времени коллайдера ВЭПП-4М (в сутках) за 2000–2010 годы между экспериментами по физике высоких энергий с детектором КЕДР и исследованиями на выведенных пучках синхротронного излучения (СИ). На рис. 1.4 — распределение рабочего времени накопителя ВЭПП-3 за 2000–2010 годы между экспериментальными программами: исследования на пучках синхротронного излучения и эксперименты по ядерной физике на внутренней мишени (установка «Дейтрон»).

Решение физических задач, поставленных перед комплексом ВЭПП-4 начиная с 2000 года, требует существенных усилий по исследованию динамики пучка, постанов-

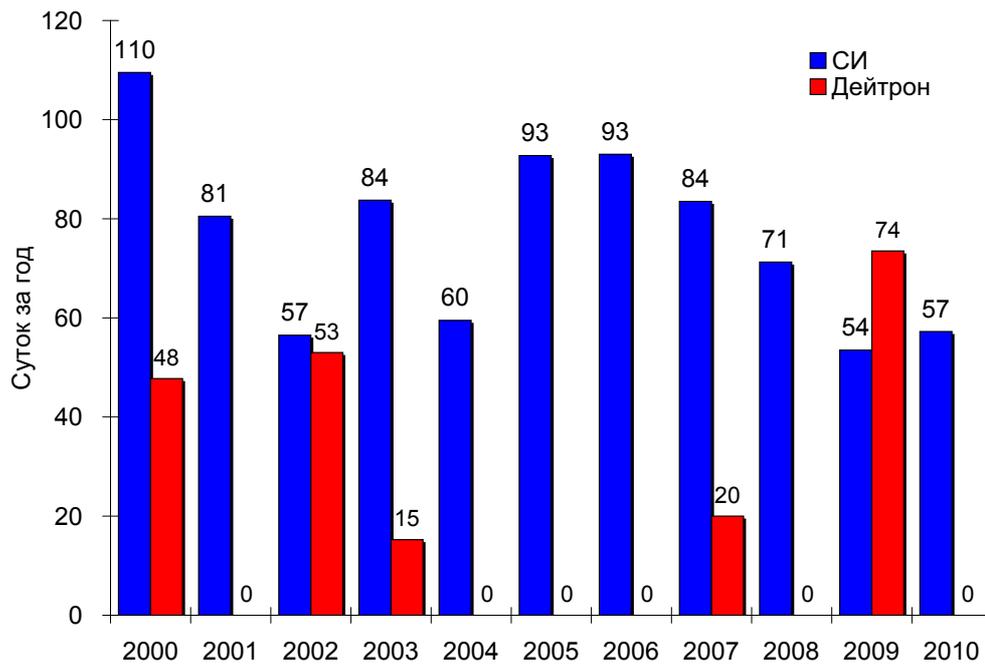


Рис. 1.4: Эксперименты на ВЭПП-3.

ки и отработки новых уникальных экспериментальных методик, новых видов диагностики пучка, модернизации и улучшения практически всех систем комплекса. Данный обзор представляет собой попытку систематического описания комплекса с точки зрения физики и техники ускорителей с упором на те аспекты, которые позволили (и позволяют сейчас) получать на ВЭПП-4 результаты мирового класса.

2 История

ИЯФ СО РАН является одним из пионеров в создании установок со встречными пучками и изучении с их помощью элементарных частиц. Встречные пучки дают колоссальный выигрыш в энергии взаимодействия частиц по сравнению с экспериментами, проводимыми с неподвижной мишенью. Первые эксперименты в ИЯФ были поставлены на установке со встречными электронными пучкам ВЭП-1 (1964 год) и установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2 (1966 год) с максимальными энергиями 2×160 МэВ и 2×670 МэВ, соответственно [2]. Это были накопительные кольца со слабой фокусировкой. После выполненных на них первых экспериментов, продемонстрировавших уникальные возможности метода встречных пучков, естественно, встала задача создания установок со встречными электрон-позитронными пучками более высоких энергий, открывающих широкие перспективы для экспериментов по физике элементарных частиц. С этого времени эта тематика начала бурно развиваться в ведущих ядерных центрах.



Рис. 2.1: А.Н. Скринский, В.П. Приходько и И.Я. Протопопов обсуждают конфигурацию комплекса ВЭПП-4 (конец 1960-х).

В 1966 году было принято решение о сооружении установки ВЭПП-3 с энергией 2×3.5 ГэВ [3] с перспективой дальнейшего повышения энергии на следующей установке с очередным названием ВЭПП-4. Обстоятельства сложились так, что именно на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4 (рис. 2.1), периметр которого состав-

лял 360 метров, а максимальная энергия пучка частиц — 6 ГэВ, была выполнена программа существенного увеличения энергии встречных пучков [4].

Геометрически ВЭПП-4 состоял из двух раздвинутых жестко-фокусирующих полуколец с ФОДО-структурой, соединенных двумя согласующими промежутками (рейстрек). Один промежуток (экспериментальный) служил для организации места встречи и постановки детектора, другой (технический) — для ускоряющих резонаторов и систем впуска пучков. В техническом промежутке орбиты электронов и позитронов были разведены, встреча пучков проходила только в экспериментальном промежутке. Для инжекции была создана каскадная схема, включающая в себя линейный ускоритель, синхротрон и накопительное кольцо ВЭПП-3, которое стало играть роль бустера. Получение позитронов было обеспечено созданием оригинального сильноточного электронного ускорителя на энергию свыше 40 МэВ, на выходе которого путем конверсии электронов производился позитронный пучок для последующего ускорения в синхротроне [63].

В 1980 — 1985 годах на коллайдере ВЭПП-4 была выполнена обширная программа экспериментов по физике элементарных частиц с использованием двух детекторов: ОЛЯ и МД-1. В 1980 году с детектором ОЛЯ были проведены прецизионные измерения масс семейства только что открытых ψ -мезонов [5], а после ввода детектора МД-1 в 1982 году — прецизионные измерения масс Υ -мезонов [6]. Прецизионное измерение энергии пучков проводилось методом резонансной деполяризации, предложенным в ИЯФ [7]. Необходимый для этих экспериментов поляризованный пучок получался за счет радиационной поляризации в бустере ВЭПП-3 при экспериментах с ψ -мезонами или непосредственно в ВЭПП-4 для экспериментов с Υ -мезонами, где время радиационной поляризации было около часа. Для измерения величины поляризации пучков было предложено и создано несколько типов поляриметров, основанных на использовании спиновой зависимости в эффектах внутрисгусткового рассеяния и обратного комптоновского рассеяния, причем в последнем наряду с лазерным пучком использовалось синхротронное излучение от встречного пучка [8]. На ВЭПП-4 впервые были проведены эксперименты по наблюдению спиновой зависимости интенсивности синхротронного излучения (СИ). Показано, что наблюдение этой квантовой поправки (порядка 10^{-4}) к мощности СИ является эффективным способом измерения степени поляризации в электрон-позитронных накопителях [9].

Максимальная светимость на энергии 5 ГэВ достигала $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом амплитудная функция бетатронных колебаний (бета-функция), определяющая поперечный размер пучка, составляла 12 см в месте встречи пучков. Особенностью детектора МД-1 было поперечное магнитное поле, являющееся частью магнитной структуры коллайдера и обеспечивающее поворот пучка на 18 градусов. Такое решение давало возможность постановки экспериментов по двухфотонной физике благодаря удобной регистрации электронов и позитронов, выпадающих из ускорения после двухфотонного события. Обзор всех экспериментов, поставленных с детектором МД-1, представлен в работе [10]. Из результатов, полученных на ВЭПП-4, следует отметить открытие эффекта ограничения прицельных параметров поперечными размерами пучка в однократном тормозном излучении [11]. Это открытие послужило стимулом для создания точной теории эффекта (который также существенен для процессов двухфотонного рождения частиц), и таким образом, появилась новая глава в квантовой электродинамике.

С началом экспериментов на ВЭПП-4 начались поиски путей модернизации этой установки с целью повышения светимости и создания новых экспериментальных воз-

возможностей. Рассматривались многие варианты развития комплекса, в том числе монохроматизация энергии взаимодействия пучков в месте встречи [12] с целью изучения узких резонансов, получение продольной поляризации [13] и др. В итоге было решено и далее развивать программу двухфотонной физики, обеспечив при этом возможности более глубокого изучения и других интересных процессов. Для этого был создан новый современный детектор КЕДР [1] с продольным магнитным полем. Системы детектора, в числе которых находится калориметр с жидким криптоном весом в 23 тонны, позволяют идентифицировать продукты реакций с высоким пространственным и энергетическим разрешением. Новая оптическая схема экспериментального промежутка с поворотными магнитами представляет собой спектрометр, позволяющий с высокой точностью определять импульсы электронов и позитронов, выпадающих из ускорения при двухфотонном событии. Впоследствии этот спектрометр был использован для мечения фотонов обратного комптоновского рассеяния. В новой схеме удалось уменьшить бета-функцию в месте встречи до 5 см. В середине полуколец были организованы вставки для электростатического разведения орбит электронов и позитронов, что дало возможность реализовать режим 2×2 ступка. Существенным моментом модернизации стала симметризация магнитной структуры полуколец. В старом коллайдере ВЭПП-4 магнитная структура не могла быть зеркально симметричной, так как промежутки были введены в разрыв структуры ФОДО. Как следствие и сами промежутки не могли быть зеркально симметричными. В ВЭПП-4М магнитные элементы северного полукольца были перевернуты относительно радиального направления, что позволило всю структуру сделать зеркально симметричной относительно центра прямолинейных промежутков. Это дало возможность помимо оптимального решения ускорительных задач уменьшить число магнитных элементов и источников питания.

Первый этап модернизации, затронувший в основном магнитную структуру коллайдера ВЭПП-4М, была завершена в конце 1992 года. В последующие годы модернизация комплекса проводилась уже параллельно с проведением экспериментов. На современной базе была значительно обновлена система управления всеми установками комплекса [14], создана новая система оптической диагностики параметров пучка [15], системы термостабилизации охлаждающей воды [16], системы продольной и поперечной обратной связи [17] и др.

До ввода в эксплуатацию детектора КЕДР был поставлен цикл экспериментов с использованием меченого пучка гамма-квантов обратного комптоновского рассеяния. В этих экспериментах были исследованы нелинейные процессы квантовой электродинамики в сильном магнитном поле. Впервые в мире зарегистрирован процесс расщепления фотона в сильном кулоновском поле ядра, имеющий предельно малую относительную вероятность [18], а также процесс Дельбрюкковского рассеяния фотона [19]. На меченом пучке этих фотонов была проведена калибровка около 9000 кристаллов калориметра детектора BELLE (Япония) [20].

С 2000 года начались эксперименты с детектором КЕДР. После подготовительного периода, в течение которого были проведены работы по минимизации влияния магнитных элементов детектора на динамику пучка [21] с целью получения светимости и сохранения поляризации, был выполнен большой цикл экспериментов по физике высоких энергий в области от 2×0.9 ГэВ до 2×3.5 ГэВ. Это, прежде всего, прецизионные измерения масс семейства ψ -мезонов и изучение свойств этих частиц; измерение массы τ -лептона; поиск узких резонансов; измерение параметра R , характеризующего полное сечение образования адронов; а также другие работы, см. Гл. 3.

Одновременно велась экспериментальная работа в области ускорительной физики. Были проведены исследования нелинейной динамики пучка [22, 23], эффектов встречи, радиационной поляризации [24, 57], энергетического разброса [25, 26], импедансов вакуумной камеры, коллективных эффектов и неустойчивостей [27] и др. Достигнута рекордная точность измерения частоты прецессии спина частиц в накопителе [28]. В последние годы освоена новая методика измерения энергии и энергетического разброса пучка, основанная на регистрации высокоэнергетичной части спектра обратно рассеянных комптоновских фотонов [29]. Введены в эксплуатацию системы подавления поперечных и продольных неустойчивостей пучка [30, 31], работающие в режиме 2×2 сгустка. С помощью этих систем планируется увеличить ток в сгустке до величины 30 мА, необходимой для получения светимости порядка $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при энергии пучка 4 ГэВ и выше. На низкой энергии (до 2 ГэВ) эксперименты ведутся при светимости около $2 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом ток пучка ограничен эффектами встречи.

При работе на высокой энергии ожидается дефицит позитронов. Этот дефицит будет ликвидирован после ввода в эксплуатацию нового инжекционного комплекса, который в настоящее время находится в стадии запуска [32]. Инжекция пучков в коллайдер ВЭПП-4М на первом этапе будет вестись с использованием бустера ВЭПП-3. Несмотря на меньшую светимость по сравнению с В-фабриками, на ВЭПП-4М имеется интересная программа исследований, что связано с определенными преимуществами коллайдера и детектора КЕДР.

3 Важнейшие результаты

В этой главе кратко перечисляются самые важные результаты, полученные на комплексе ВЭПП-4 за последние годы. Полную и подробную информацию можно получить в приведенных ссылках.

3.1 Физика высоких энергий

С 2002 г. на комплексе ВЭПП-4 проводятся эксперименты по физике высоких энергий в диапазоне энергии пучка 0.9 – 2.0 ГэВ. При работе на такой низкой энергии пиковая светимость электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М в экспериментах с детектором КЕДР составляет $(1 \div 2.5) \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, средний темп набора интеграла светимости — около 300 нб^{-1} в неделю. На рис. 3.1 представлен график набора интеграла светимости за 2004 – 2010 гг.

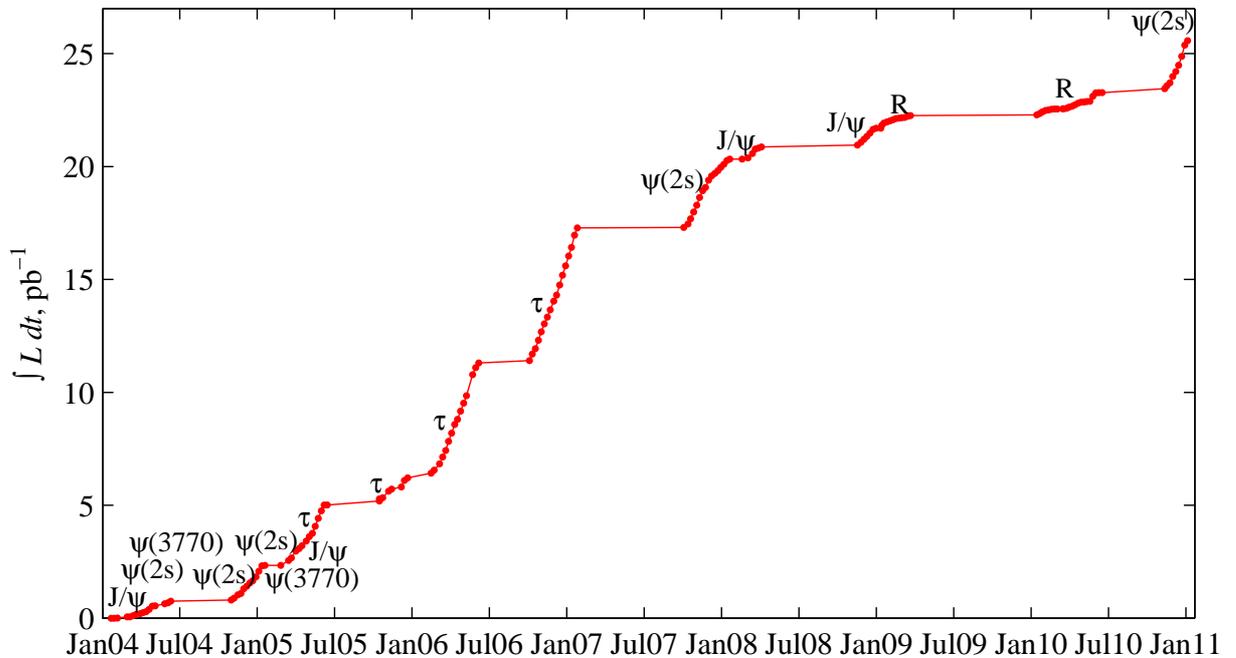


Рис. 3.1: Интеграл светимости за 2004 – 2010 гг.

Основными результатами по физике высоких энергий, полученными в ходе экспериментов, проведенных в 2000 – 2010 гг., являются:

- прецизионные измерения масс J/ψ , $\psi(2s)$ и $\psi(3770)$ -мезонов [33–36];
- прецизионное измерение массы τ -лептона на пороге рождения [37–42];
- экспериментальное изучение распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ и $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ [43];
- измерение масс D -мезонов [44];
- измерение лептонной ширины J/ψ -мезона [45];
- измерение $J/\psi \rightarrow \eta_c\gamma$ [46];
- измерение параметров $\psi(3770)$ -мезона [47].

Обзор результатов по физике высоких энергий, полученных на комплексе ВЭПП-4 – КЕДР, представлен в работе [48]. Калибровка энергии частиц методом резонансной деполяризации и процедура восстановления энергии между калибровками с использованием измеряемых параметров ВЭПП-4М [49] позволяет определять массы элементарных частиц с рекордно высокой точностью. Так, точность измерения масс J/ψ и $\psi(2s)$ была улучшена в 3 – 7 раз по сравнению с результатами измерений, выполненных в других экспериментах. На текущий момент точнее измерены только массы электрона, протона, нейтрона, мюона и π^\pm -мезона.

В 2008 году закончен набор статистики в эксперименте по прецизионному измерению массы τ -лептона на пороге его рождения. Главной целью эксперимента являлось уточнение массы τ -лептона, знание которой при известных значениях времени жизни и вероятности распада на электрон, нейтрино и антинейтрино позволяет выполнить проверку гипотезы лептонной универсальности — одного из основных постулатов теории электрослабого взаимодействия Вайнберга-Салама. Обработка данных эксперимента на текущий момент позволяет получить массу τ -лептона с наилучшей в мире точностью [41].

Продолжаются эксперименты по физике высоких энергий в области рождения c -кварков. Получены предварительные результаты по измерению масс заряженного и нейтрального D -мезонов, $\psi(3770)$ -мезона с точностями, сравнимыми или выше среднемировых [35]. Нейтральный и заряженный D -мезоны являются легчайшими состояниями с открытым очарованием. Точное знание их масс важно, так как оно является точкой отсчета для масс возбужденных состояний. Кроме того, измерение их масс необходимо для понимания природы недавно открытого состояния $X(3872)$, близкого по массе к порогу рождения пары D^0 - D^{*0} . До 2007 года среднемировая точность измерения масс D -мезонов составляла около 0.5 МэВ и в основном определялась двумя наиболее точными экспериментами MARK-II [50] и ACCMOR [51]. В 2007 году коллаборацией CLEO-c измерена масса D^0 с точностью 0.18 МэВ из анализа распада $D^0 \rightarrow K_s \varphi$ [52]. В эксперименте с детектором КЕДР нами измерены массы нейтрального и заряженного D -мезонов [44]. Наше значение массы D^0 -мезона согласуется с полученным другим методом коллаборацией CLEO-c более точным значением, а массы D^\pm -мезона — со среднемировым значением, т.е. является наиболее точным прямым измерением массы D^\pm -мезона.

Резонанс $\psi(3770)$ был открыт тридцать лет назад, но его теоретическое описание до сих пор неясно. Существующие модели предсказывают параметры резонанса, отличающиеся от экспериментальных данных. На детекторе КЕДР проведено три сканирования в области резонансов $\psi(2S)$ и $\psi(3770)$ и набран суммарный интеграл светимости около 2.5 пб^{-1} , в результате чего с измерены масса $\psi(3770)$ и его полная ширина [47], впервые при обработке данных учитывалась интерференция с нерезонансным сечением рождения D -мезонов.

3.2 Синхротронное излучение

Исследования на пучках синхротронного излучения (СИ) проводятся на 12 экспериментальных станциях накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М (рис. 3.2).

Основные направления исследований: LIGA-технология и рентгеновская литография, наносекундная диагностика быстротекущих процессов, прецизионная дифрактометрия и аномальное рассеяние, локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ, дифрактометрия при высоких давлениях, рентгеновская

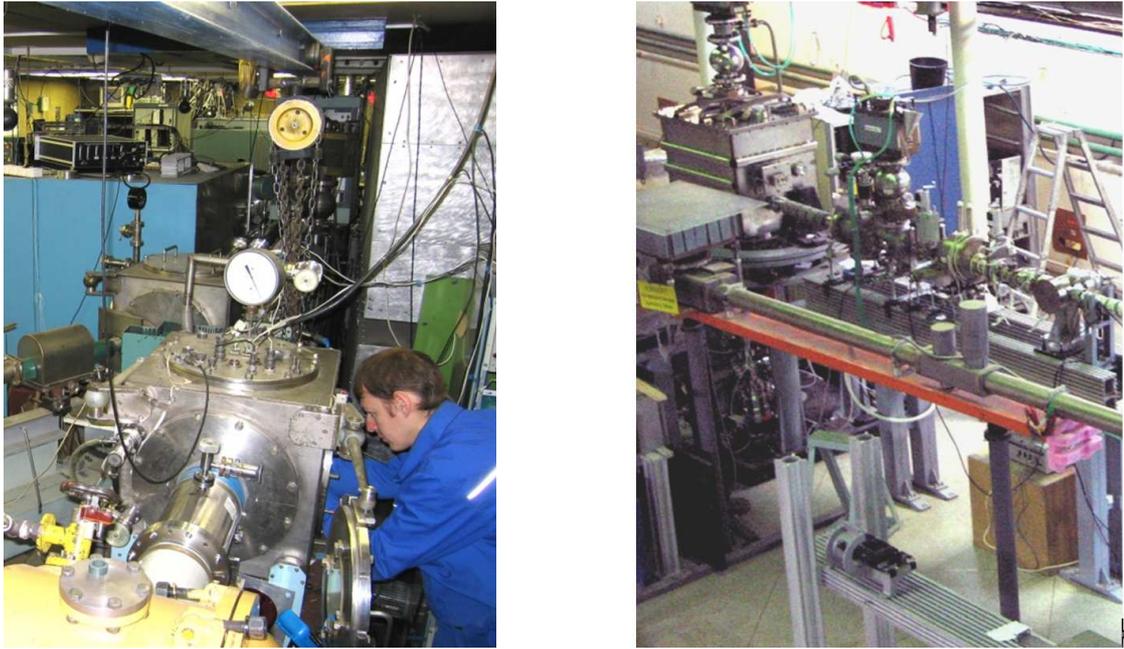


Рис. 3.2: Станции СИ на накопителях ВЭПП-3 (слева) и ВЭПП-4М (справа).

микроскопия и томография, дифрактометрия с временным разрешением, малоугловое рассеяние, EXAFS-спектроскопия, метрология в ВУФ и мягком рентгеновском диапазоне. Подробно ознакомиться с работами, ведущимися на экспериментальных станциях, а также найти ссылки на оригинальные публикации можно в ежегодных отчетах Сибирского центра синхротронного излучения [54].

3.3 Ядерная физика

В течение ряда лет в ИЯФ СО РАН проводятся исследования электромагнитной структуры дейтрона в экспериментах с тензорно-поляризованной внутренней газовой мишенью на установке «Дейтрон» в накопителе ВЭПП-3 [55] (рис. 3.3).

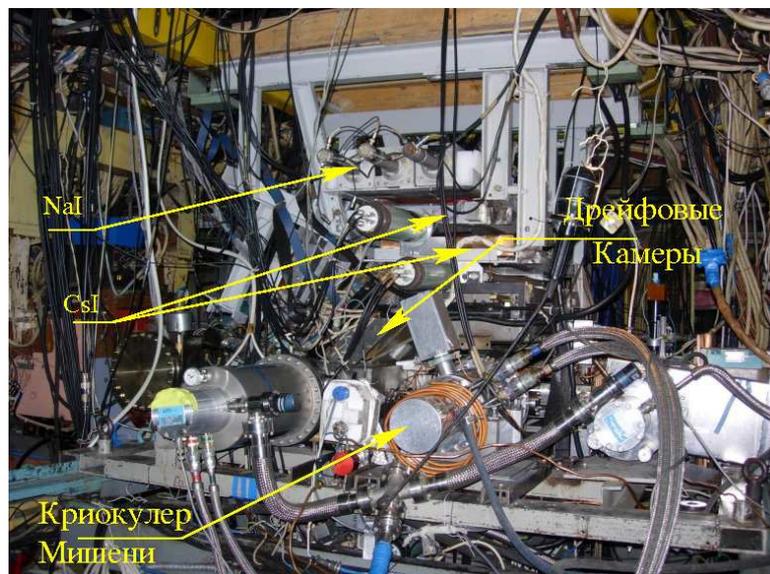


Рис. 3.3: Установка «Дейтрон» на накопителе ВЭПП-3.

Такие исследования играют ключевую роль в ядерной физике, поскольку результаты экспериментов с этой простейшей ядерной системой могут быть истолкованы, непосредственно исходя из современных представлений о нуклон-нуклонном взаимодействии, мезонных обменных токах и других ненуклонных степенях свободы, и, следовательно, могут служить проверкой этих представлений. Довольно большой ток накопителя ВЭПП-3 — свыше 100 мА и плотная мишень обеспечивают высокую светимость при проведении эксперимента.

Другой цикл экспериментов по ядерной физике на ВЭПП-3 с использованием внутренней газовой мишени посвящен исследованию электромагнитного формфактора протона в упругом рассеянии электронов и позитронов на протонах [56].

Результаты экспериментальных работ, выполненных на установке «Дейтрон», изложены в публикациях [57–61] и др.

4 Инжектор «Позитрон»

4.1 Общее описание

В работающем ныне на комплексе ВЭПП-4 позитронном инжекторе позитроны получают путем конверсии электронов, ускоренных в сильноточном линейном ускорителе (ЛУ) до энергии 50 МэВ. Далее электронные и позитронные пучки ускоряются в синхротроне Б-4 до энергии 350 МэВ, и затем в накопителе ВЭПП-3, работающем в бустерном режиме — до 1.8 ГэВ. Создание ЛУ с большой накопленной энергией оказалось возможным в связи с разработкой в ИЯФ гирокона — мощного СВЧ-генератора с несгруппированным релятивистским пучком, который был предложен Г.И. Будкером в 1967 году [62].

Блок-схема всей установки, включая синхротрон Б-4, линейный ускоритель, импульсный гирокон, ускоритель электронов ЭЛИТ-3А и все остальные элементы, необходимые для получения и транспортировки пучков, приведена на рис. 4.1, общий вид установки — на рис. 4.2.

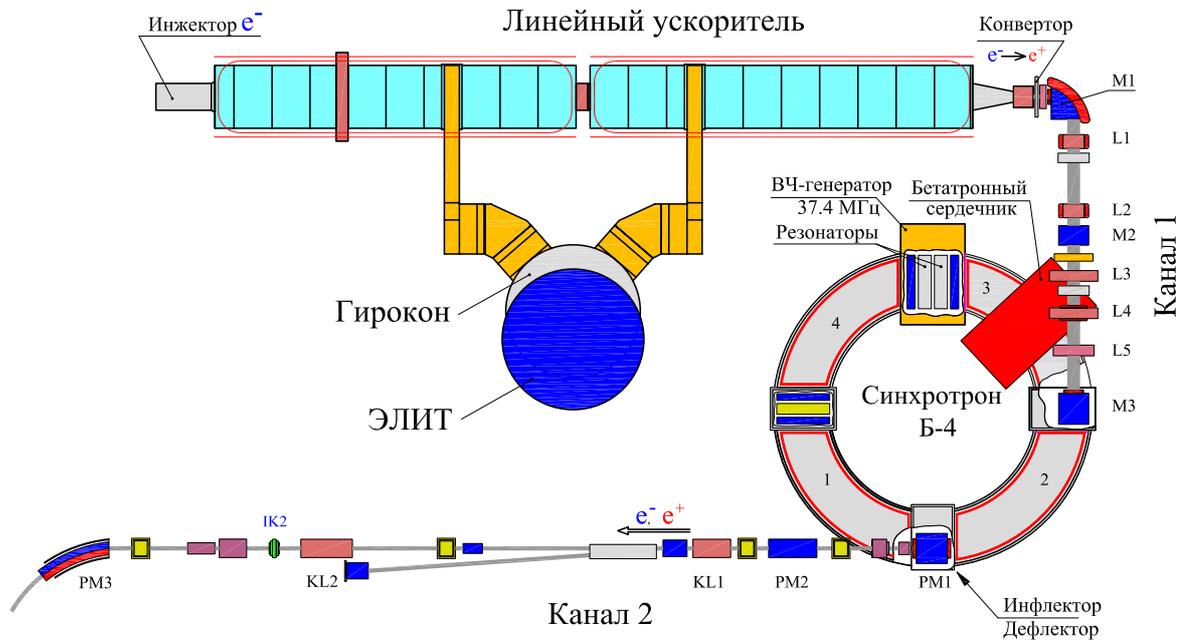


Рис. 4.1: Блок-схема позитронного источника.

Электроны с энергией 100 кэВ в течение 27 нс (1 оборот в синхротроне Б-4) инжектируются пушкой и ускоряются в двух секциях линейного ускорителя до энергии 50 МэВ. В блоке конверсии электроны фокусируются на вольфрамовый конвертор толщиной 3.5 мм, а полученные позитроны с энергией 7 МэВ (максимум спектра) направляются через систему транспортировки (канал 1) в синхротрон Б-4, где ускоряются до энергии 350 МэВ в синхротронном режиме. Для улучшения синхротронного захвата применено предварительное ускорение частиц до энергии 13 МэВ с помощью бетатронного сердечника. При энергии 350 МэВ частицы через электронно-оптический канал переупускаются в накопитель ВЭПП-3.

Возбуждение ЛУ производится от импульсного гирокона, преобразующего энергию электронного пучка ускорителя ЭЛИТ в энергию электромагнитных колебаний.

Получение электронов с энергией 7 МэВ на выходе ЛУ для последующего ускорения в синхротроне производится с помощью перестройки собственной частоты второй



Рис. 4.2: «Позитрон»: общий вид.

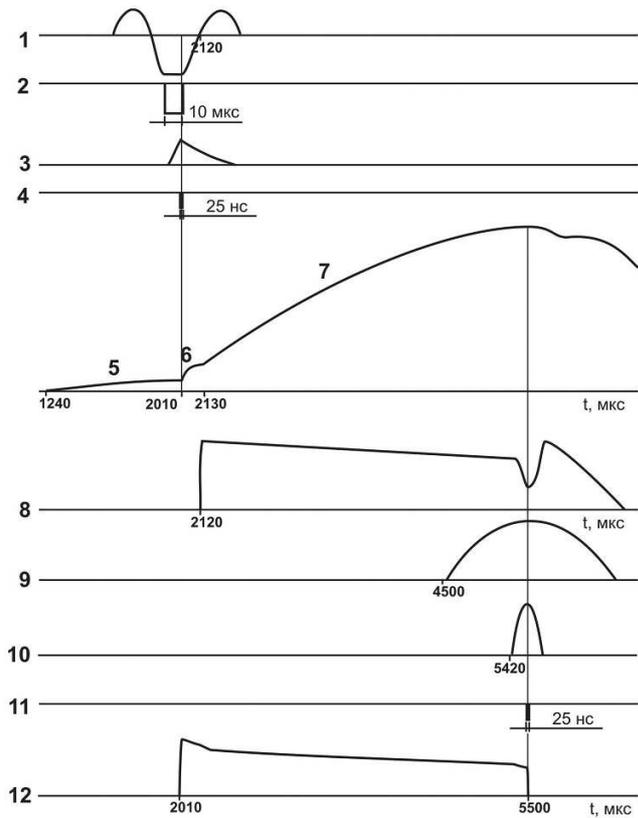


Рис. 4.3: «Позитрон»: основные импульсы.

секции линейного ускорителя таким образом, что ускоренный в первой секции пучок проходит через вторую секцию в замедляющей фазе напряжения. В этом случае требуется на несколько микросекунд задержать запуск пушки. Конвертор при этом выводится из области прохождения пучка, а в каналах транспортировки пучка и в синхротроне изменяются направления магнитных и электрических полей.

Основные импульсы позитронного источника [63], характеризующие его работу, приведены на рис. 4.3, цифрами обозначены: 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 Б-4; 9 – магнитное поле радиальной коррекции перед выпуском; 10 – магнитное поле вертикальной коррекции перед выпуском; 11 – ток выпущенного пучка; 12 – ток пучка в процессе ускорения.

4.2 Ускоритель электронов ЭЛИТ

В высоковольтном ускорителе ЭЛИТ-3А [64] 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. Поскольку обеспечение монохроматичности пучка привело бы к большим величинам емкостей контуров, габаритам установки и периоду колебаний напряжения в контурах, а также к низким энергетическим характеристикам, был выбран режим с 10%-м изменением

напряжения высоковольтного контура в период протекания импульса тока нагрузки, а требуемая монохроматичность пучка обеспечивается специальной системой коррекции. Коэффициент связи контуров равен 0.6, собственные частоты 12 кГц.

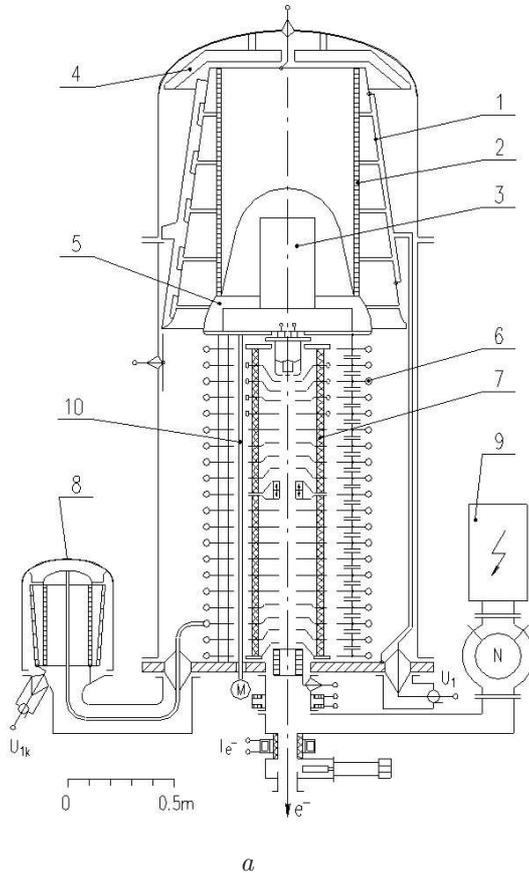


Рис. 4.4: Схема конструкции (а) и внешний вид (б) ускорителя ЭЛИТ-3А: 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка, 3 – защитный электрод; 4, 5 – магнитопроводы; 6 – высоковольтный емкостной накопитель; 7 – ускорительная трубка; 8 – корректирующий колебательный контур; 9 – магниторазрядный насос; 10 – изоляционные штоки для управления параметрами пушечного узла.

Схема конструкции ЭЛИТ-3А и внешний вид котла показаны на рис. 4.4. 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 уменьшения габаритов ускорителя установлены магнитопроводы (4) и (5). Котел ускорителя заполнен сжатым газом SF_6 при давлении до 10 атм.

Ускорительная трубка состоит из четырех модулей, между вторым и третьим модулями в эквипотенциальной области расположена фокусирующая линза из постоянных магнитов. Модули собраны из стеклянных изоляторов, электроды выполнены из нержавеющей стали. Размеры пучка на выходе из ускорительной трубки регулируются импульсной электромагнитной линзой, расположенной под трубкой. Высоковольтная колонна состоит из 37 секций (по числу секций ускорительной трубки). В каждой секции – 18 конденсаторов, образующих 2 группы, соединенные параллельно. Индуктивности корректирующего контура помещены в бачок (8), также заполненный SF_6

с небольшим избыточным давлением. Регулирование параметров блока управления электронной пушкой осуществляется с помощью штоков из изоляционного материала (10), проходящих к блоку управления через днище ускорителя и высоковольтную колонну.

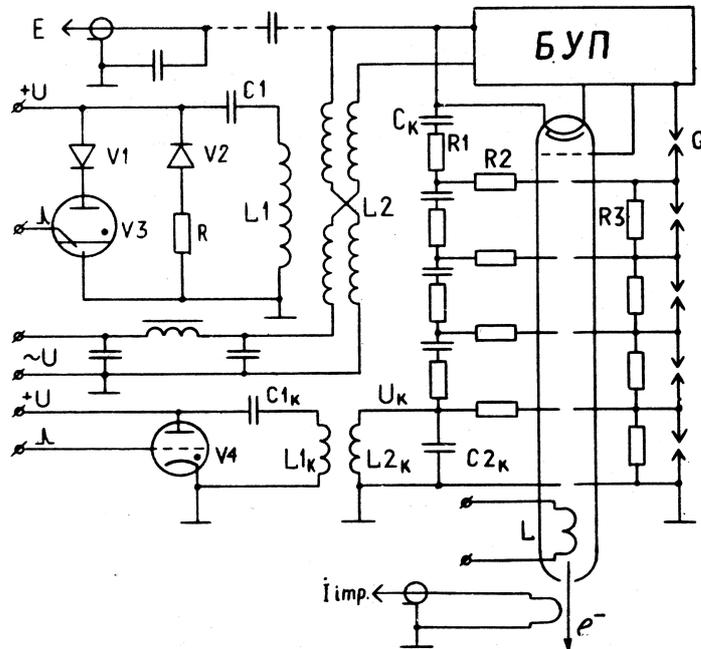


Рис. 4.5: Принципиальная электрическая схема ЭЛИТ-3А.

Принципиальная электрическая схема ускорителя ЭЛИТ-3А приведена на рис. 4.5. Корректирующее напряжение, которое обеспечивает постоянство суммарного ускоряющего напряжения на трубке во время пролета пучка электронов, создается колебательным контуром $L_{2к}, C_{2к}$, подключенным к двум нижним секциям ускорительной трубки.



Рис. 4.6: Пушка с многоячейстым катодом.

С целью повышения надежности инжекционной части комплекса ВЭПП-4, в 2003 году была осуществлена модернизация ЭЛИТ-3А:

- Поставлена пушка с многоячейстым катодом (19 таблеток из гексаборида лантана, каждая диаметром 8 мм). Общий диаметр катодного узла равен 46 мм, см. рис. 4.6.
- В соответствии с оптикой пушки изменена оптика трубки ЭЛИТ, включая электроды и линзу в середине трубки.
- На верхнем модуле трубки поставлен фланец с уплотнением «con-flat», что позволило значительно улучшить вакуумные условия в районе пушки.

В результате заметно уменьшилось токооседание в трубке, возросла электрическая прочность трубки, повысилась надежность. ЭЛИТ стал устойчиво работать в режиме 800 – 900 Дж в пучке.

4.3 Импульсный гирокон

Источником ВЧ-мощности для линейного ускорителя является импульсный гирокон мощностью 65 МВт [65]. Конструктивная схема гирокона изображена на рис. 4.7.

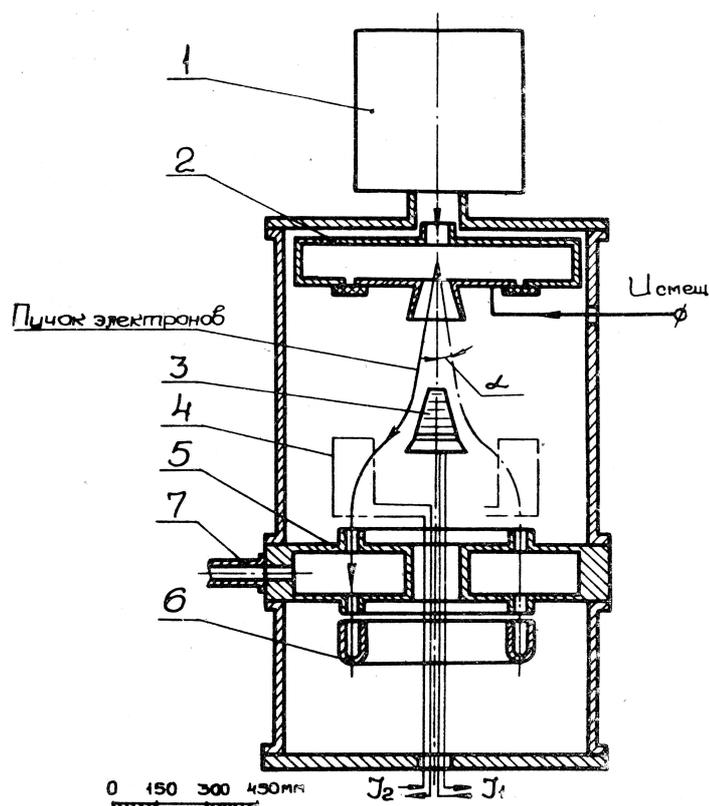


Рис. 4.7: Схема импульсного гирокона: 1 – источник электронов ЭЛИТ, 2 – резонатор развертки, 3 – первая отклоняющая система, 4 – вторая отклоняющая система, 5 – выходной резонатор, 6 – коллектор, 7 – вывод высокочастотной энергии.

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 E110) и отклоняет пучок на угол 5°. Далее электроны, проходя в области

магнитного поля первой отклоняющей системы (3), отклоняются на больший угол, а затем во второй отклоняющей системе (4) направляются в кольцевую щель выходного резонатора (5). Релятивистские электроны, тормозясь в электрическом поле выходного резонатора, отдают свою энергию и возбуждают в резонаторе бегущую по азимуту электромагнитную волну. Через нижнюю кольцевую щель электроны покидают выходной резонатор и попадают на коллектор (6). Высокочастотная мощность выводится из выходного резонатора через отверстия связи, сдвинутые по азимуту на 90° , двумя волноводами (7).

За время работы позитронного источника конструкция гирокон не изменялась. Обслуживание гирокон заключается в получении оптимальных режимов работы, а также в повышении надежности. Критерием правильной настройки гирокон является максимальное токопрохождение электронов в коллектор и минимальное токооседание на отклоняющих системах при выходной мощности ВЧ сигнала, достаточной для получения максимальной энергии ускоряющего поля в линейном ускорителе.

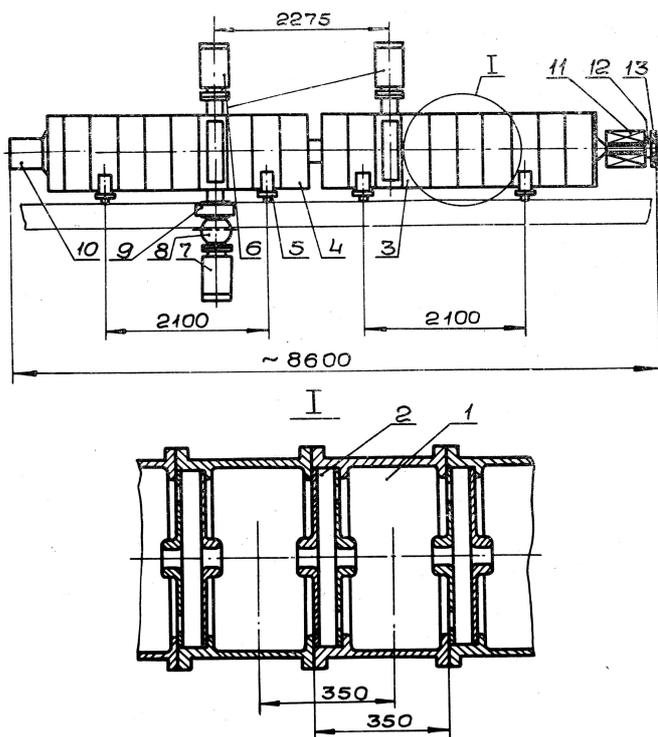
Для увеличения срока службы триодов ГИ-39 в каскадах усилителя мощности ГВЧ в 1999 году была собрана схема, позволяющая снижать напряжение накала на триодах в режимах, не требующих накопления пучка в ВЭПП-3 («ускорение», «выпуск» и «эксперимент»). В результате, если за период с 1989 г. по 1999 г. в ГВЧ было заменено 179 триодов ГИ-39, то за период с 2000 г. по 2009 г. заменили 32 триода. Таким образом, срок службы триодов ГИ-39 увеличился более чем в 5 раз.

4.4 Линейный ускоритель

Линейный ускоритель (ЛУ) (рис. 4.8) представляет собой бипериодическую цепочку связанных резонаторов, в которых на частоте 430 МГц возбуждается стоячая волна вида $\pi/2$ [66]. ЛУ выполнен в виде двух отдельных секций, каждая из которых содержит по 10 ускоряющих резонаторов (1), в промежутках между которыми расположены резонаторы связи (2). Максимальная энергия ускоренного пучка — 50 МэВ.

Возбуждается ускоряющая структура от гирокон через два одинаковых вакуумных волновода со сдвигом фаз 90° . Для компенсации этого сдвига между секциями ЛУ предусмотрен промежуток, который используется также для размещения линзы, средств наблюдения пучка 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 конвертор (12) в пятно минимального размера, 1 – 1.5 мм. Чтобы обеспечить такой размер пятна на конверторе пучок фокусируется дважды. Сначала электроны фокусируются длиннофокусной линзой так, чтобы получить минимальный размер пучка на выходе ускорителя (около 1 см). Затем короткофокусной линзой (11) производится фокусировка пучка на конверторе (12). Энергетический разброс электронов в ЛУ составляет $\Delta E/E = 25 \div 30\%$. Двойная фокусировка позволяет получить отношение размера пучка на конверторе 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 $\Delta E/E$.

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. 4.8). Щели обеспечивают коэффициент связи 0.1. Параллельный электронный пучок инжектируется непосредственно в первый резонатор из пушки Пирса, кото-



a

б

Рис. 4.8: Линейный ускоритель: *a* – схема, *б* – внешний вид. 1 – ускоряющий резонатор; 2 – резонатор связи; 3, 4 – секции ЛУ; 5 – регулируемые опоры; 7 – магниторазрядный насос; 10 – инжектор; 11, 13 – магнитные линзы; 12 – конвертор.

рая отделена от полости резонатора сеткой. Динамика пучка в инжекционном резонаторе определяется формой входной стенки. 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%. Дальнейшее увеличение количества электронов не дает существенного роста интенсивности 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 величина инжектируемого тока изменяется в пределах 150 ÷ 200 А. В первом резонаторе ЛУ происходит разбиение несгруппированного пучка на сгустки. Фазовая протяженность сгустка составляет 120°, причем почти все частицы из этого интервала фаз проходят до конца ускоряющей структуры. Однако, в достаточно малое пятно на конверторе могут быть сфокусированы только те частицы, энергетический разброс которых $\Delta E/E < 30\%$, что соответствует интервалу фаз 60° (с учетом подсадки). Можно показать, что на долю тех частиц, которые ускоряются, но дают малый вклад в выход позитронов, приходится 1/3 энергии, уносимой из резонаторов всем ускоряемым пучком. Такие потери являются хотя и заметной, но все же приемлемой «платой» за выбранную для ЛУ простейшую схему инжекции. Создание же инжектора сгруппированного электронного пучка с пиковым током 150 ÷ 200 А и фазовой протяженностью меньше 60° представляет серьезную проблему.

4.5 Конверсионная система

Эмиттанс электронного пучка на выходе ЛУ составляет около $5 \cdot 10^{-4}$ рад · см (радиус — 0.5 см, угловой разброс — 10^{-3} рад). Фокусировка электронов на конвертор и собирание родившихся позитронов осуществляется продольным магнитным полем. Оптимальная энергия позитронов, захватываемых в синхротроне — 7 МэВ; отношение количества захватываемых позитронов к количеству электронов $N^+/N^- = 2 \cdot 10^{-7} E^2$ при оптимальных условиях и отсутствии потерь [67].

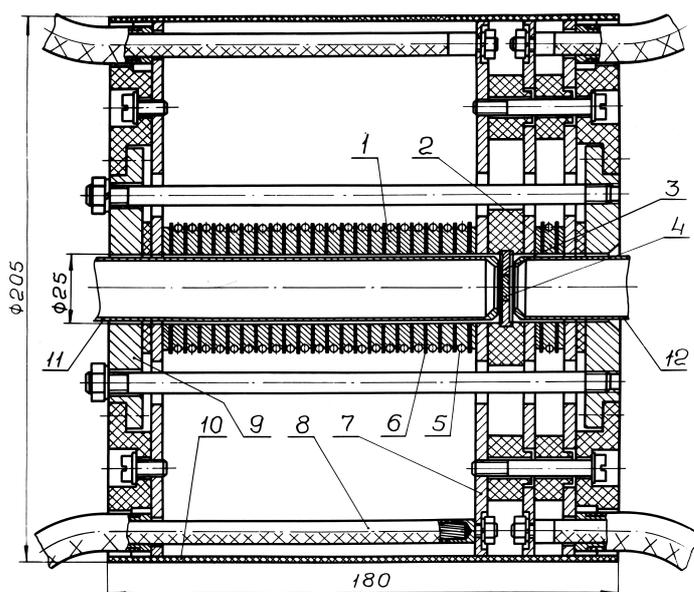


Рис. 4.9: Конверсионная система: 1 — фокусирующая линза; 2 — собирающая линза; 3 — панель конвертора; 4 — конверторная планка; 5 — трубка охлаждения; 6 — изолятор; 7 — дисковый вывод; 8 — коаксиальный кабель; 9 — фланец; 10 — экран; 11 и 12 — вакуумные трубки.

Конструктивно блок конверсии (рис. 4.9) представляет собой две линзы — фокусирующую (1) и собирающую (2), между которыми находится панель (3) с конверторной 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 выводы (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 мкм, между которыми перемещается конвертор.

Конвертор (рис. 4.10) представляет собой стальную планку (1) с продольным пазом, в который высокотемпературным вакуумным припоем впаяна вольфрамовая пластина (3) длиной 75 мм и толщиной 3.5 мм (1 радиационная единица). Со стороны входа электронов конвертор закрыт фольгой (2) для защиты выходной фольги ЛУ от осколков вольфрама, вылетающих при локальном выделении энергии электронов

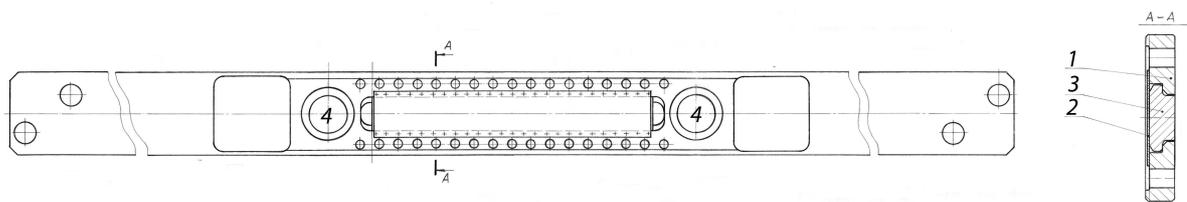


Рис. 4.10: Конверторная планка: 1 – корпус; 2 – фольга; 3 – вольфрамовый конвертор; 4 – окна для электронного пучка.

в малом объеме. 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. При работе в электронном режиме конвертор выводится в крайнее положение, и электроны свободно летят через окно (4) в конверторной планке.

По истечении довольно длительного времени эксплуатации (несколько лет) на конверторе образуется канавка, обусловленная разрушением вольфрама пучком электронов. На рис. 4.11 показана фотография конвертора со следами разрушения. Защитная фольга удалена, внизу виден выкрошившийся вольфрам. Поскольку ось конвертора смещена относительно оси падающего пучка электронов по вертикали на 0.9 мм, перевернув конвертор на 180° относительно оси пучка, можно удвоить его время жизни.

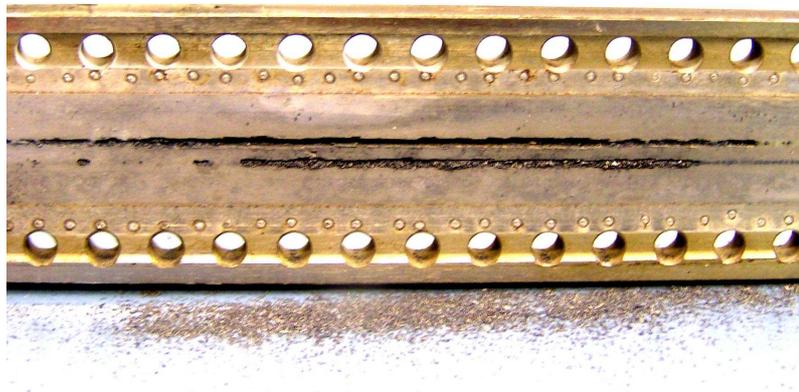


Рис. 4.11: Конвертор со следами разрушения после нескольких лет эксплуатации.

4.6 Система транспортировки пучка из ЛУ в синхротрон

Схема расположения элементов канала транспортировки пучков ЛУ – Б-4 (канал 1 на рис. 4.1) представлена на рис. 4.12, оптические функции — на рис. 4.13.

В синхротроне Б-4 принята однооборотная инжекция по вертикали с предварительным разложением частиц по энергии. Такой вариант обеспечивает максимальный захват позитронов. С учетом расположения впускной системы и искажения медианной плоскости, в синхротрон захватывается пучок с эмиттансом, равным $2.4 \cdot 10^{-2}$ см · рад. Апертура канала транспортировки рассчитана на эмиттанс $7 \cdot 10^{-2}$ см · рад. Столь большая апертура по вертикали выбрана для того, чтобы избежать потерь частиц из-за хроматической аберрации в линзах канала. Для наилучшего согласования эмиттанса пучка с акцептансом синхротрона, пучок на входе Б-4 должен иметь амплитудные функции $\beta_x = 145$ см, $\beta_y = 180$ см и дисперсионные функции $\eta_x = 170$ см, $\eta_y = \eta'_y = \eta'_x = 0$. Последнее условие, с учетом взаимного расположения синхротрона

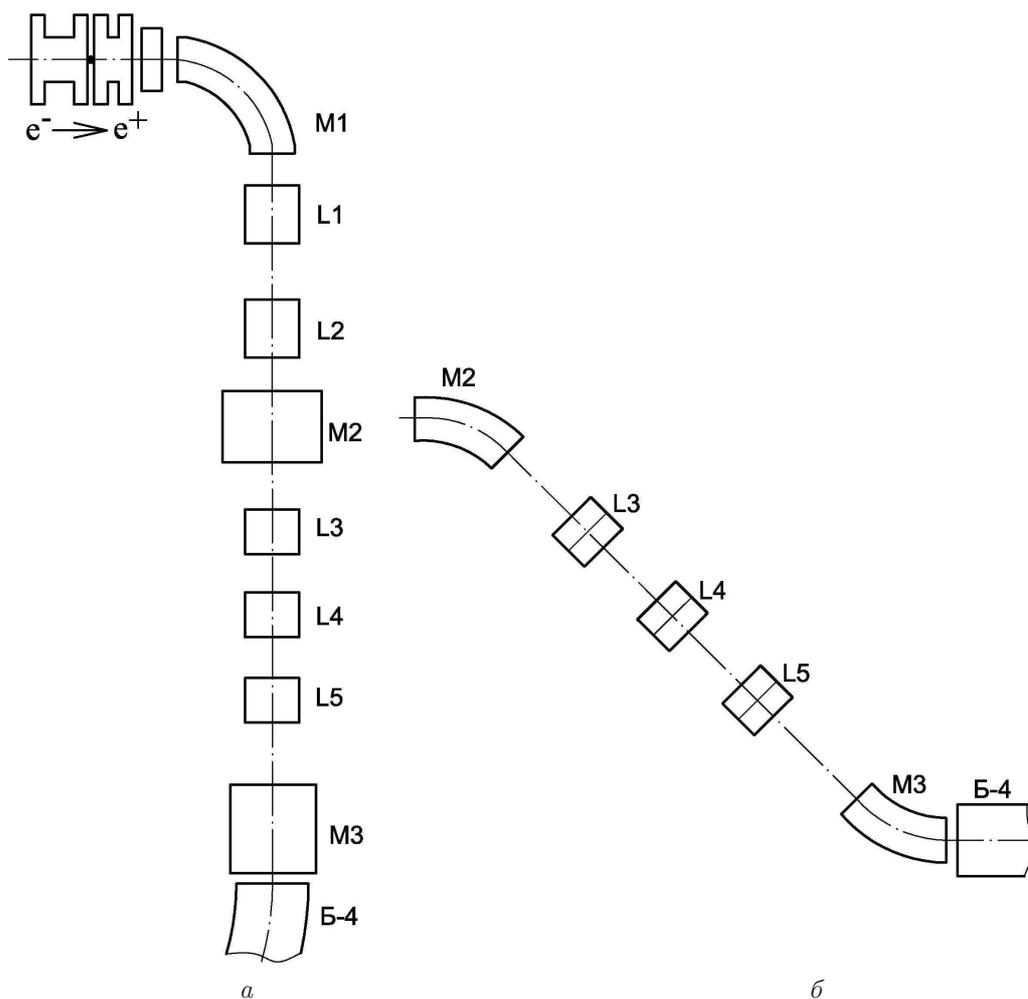


Рис. 4.12: Расположение элементов канала ЛУ – Б-4, вид в горизонтальной (а) и в вертикальной (б) плоскости.

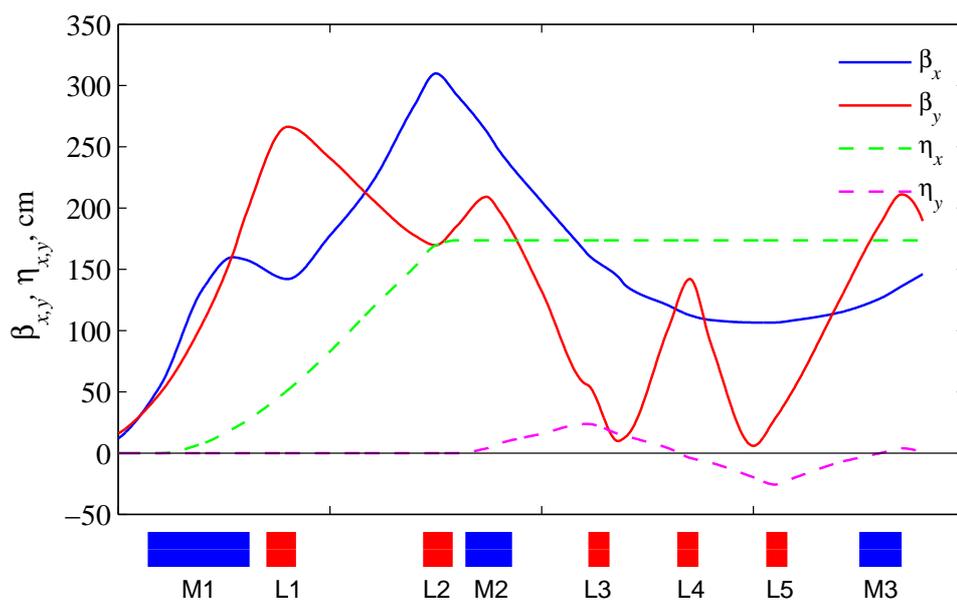


Рис. 4.13: Канал ЛУ – Б-4: бета-функции β_x , β_y и дисперсионные функции η_x , η_y .

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 канал транспортировки, что особенно важно при транспортировке пучка с большим фазовым объемом. Подготовку пучка (разложение по энергии и получение нужной β_x -функции) для транспортировки по ахроматической системе удастся осуществить одним магнитом и двумя квадрупольными линзами с прямоугольной апертурой (линзы Хэнда – Панофского).

Таким образом, канал 1 можно разбить на два участка. Первый (участок разложения пучка по энергии) включает поворотный магнит М1 (90°) и две квадрупольные линзы L1 и L2. 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 L3 и L5. 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 L4, которая расположена в нуле вертикальной дисперсионной функции η_y .

4.7 Синхротрон Б-4

Конструкция электромагнита синхротрона Б-4 [68, 69] является логическим продолжением работ по созданию железно-безжелезных магнитов в ИЯФ [70, 71]. Такая конструкция обеспечивает минимальные поля рассеяния при максимальном использовании магнитного поля по всему объему. Внешний вид синхротрона показан на рис. 4.14.



Рис. 4.14: Внешний вид синхротрона Б-4.

Магнитная система синхротрона состоит из 4-х С-образных магнитов ($R = 102$ см) азимутальной протяженностью по 88° и 4-х прямолинейных промежутков по 40 см между магнитами. Поперечное сечение электромагнита приведено на рис. 4.15.

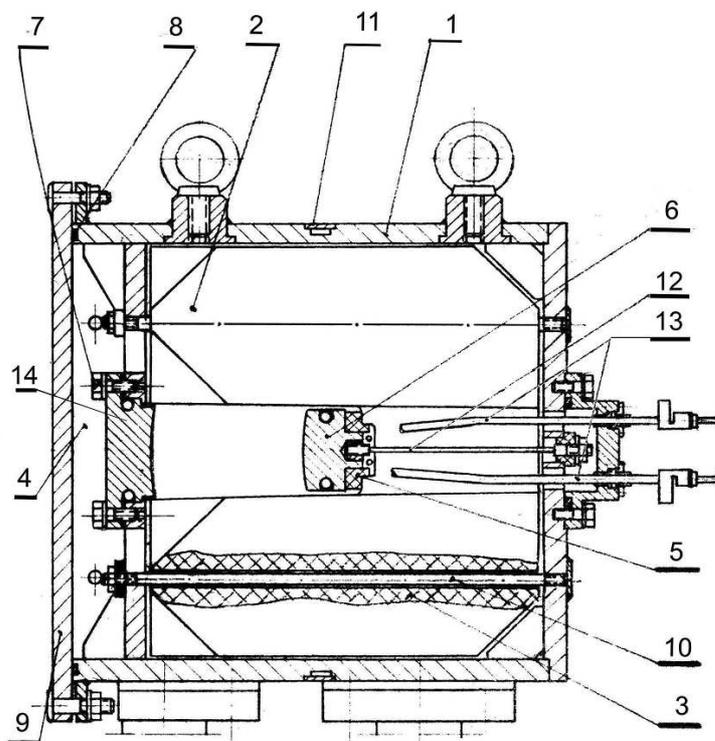


Рис. 4.15: Поперечное сечение магнита Б-4: 1 – вакуумный кожух; 2 – магнитопровод; 3 – прокладка между блоками; 4 – форкамера; 5 – изолятор между внутренней шиной и магнитопроводом; 6 – внутренняя шина; 7 – болт крепления наружной шины к корпусу; 8 – болт крепления наружной крышки корпуса; 9 – наружная 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.

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 толщиной 0.5 мм, склеенных эпоксидным компаундом. Между блоками размещены прокладки (3) из стеклотекстолита толщиной 15 мм. Благодаря скосам в прокладках, апертура магнитопровода сообщается 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).

Магнит синхротрона – слабофокусирующий. Необходимая форма магнитного поля (показатель спада $n = 0.4$) обеспечивается как наклоном полюсов, так и профилем шин. 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 магниторазрядных насосов с азотными ловушками обеспечивают вакуум 10^{-4} Па. Предварительная откачка (после напуска атмосферы) обеспечивается форвакуумным агрегатом и паромасляным насосом с азотной ловушкой до давления 10^{-2} Па.

Однооборотная инжекция осуществляется по вертикали с захватом пучка, имеющего большой фазовый объем. Впуск производится через наклонный канал в железе магнитопровода и впускной магнит, расположенный в прямолинейном промежутке. Квазипостоянное магнитное поле инжекции формируется током от отдельного генератора. 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. Вихревая ЭДС создается бетатронным сердечником, охватывающим один из квадрантов электромагнита. 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.

Для более полного использования железа бетатронного сердечника он подмагничивается импульсным полем, длительность которого много больше, чем длительность бетатронного ускорения. В конце бетатронного ускорения включается основное поле и ВЧ-генератор. Для получения ведущего поля при конечной энергии электронов 350 МэВ требуется ток около 85 кА с учетом насыщения железа электромагнита.

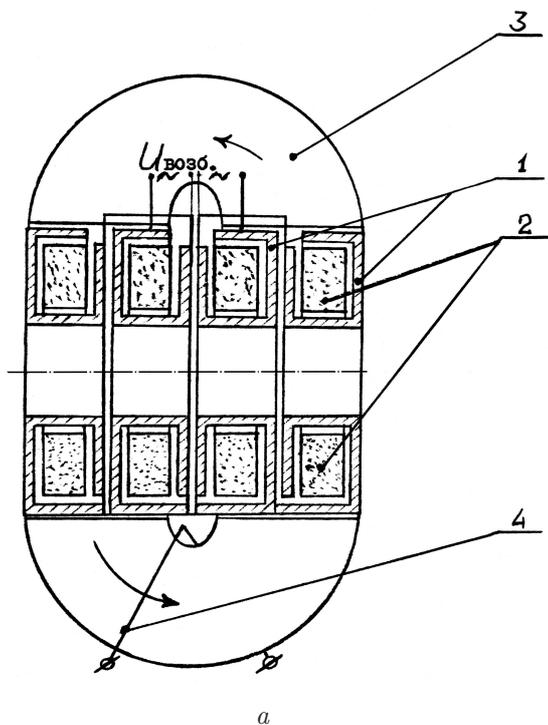


Рис. 4.16: Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) ускоряющей системы Б-4: 1 – резонансные секции; 2 – ферриты; 3 – магнитопровод электромагнита; 4 – обмотка электромагнита.

ВЧ-генератор [72] работает на первой гармонике частоты обращения. 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 $\lambda/4$ (λ — длина волны), заполненную ферритами. Перестройка по частоте осуществляется подмагничиванием ферритов в электромагните. Конструктивная схема и внешний вид ускоряющей системы Б-4 перед постановкой в промежуток показаны на рис. 4.16.

Ускоряющая система состоит из 4-х резонансных секций, соединенных в две группы. Каждая секция (1) заполнена ферритовыми кольцами (2) с размерами $250 \times 180 \times 16$ мм³. Высота набора колец 32 мм. Подмагничивание ферритов для частотной перестройки осуществляется электромагнитом (3), (4). Рассеиваемая в ферритах мощность отводится на охлаждаемый водой корпус. Суммарное ускоряющее напряжение составляет 22 – 23 кВ; импульсная мощность — 60 кВт; средняя мощность, рассеиваемая в резонансной секции при частоте повторения 1 Гц, — 75 Вт.

Для измерения положения и тока пучка на входе и выходе впускного магнита М3 расположены пробники, представляющие собой двухслойную комбинацию толстых медных пластин толщиной 6 мм и, со стороны пучка, — графитовых пластин толщиной 4 мм (DL3). Схема расположения пробников Б-4 приведена на рис. 4.17. Для измерения орбиты и распределения пучка в камере Б-4 в начальный период после захвата в трех прямолинейных промежутках расположены пробники в виде длинных узких полос поперечным размером 4×2 мм², которые могут двигаться по вертикали и горизонтали по всей апертуре (обозначены как 8, 11, 12, 14, 15, 17 на рис. 4.17).

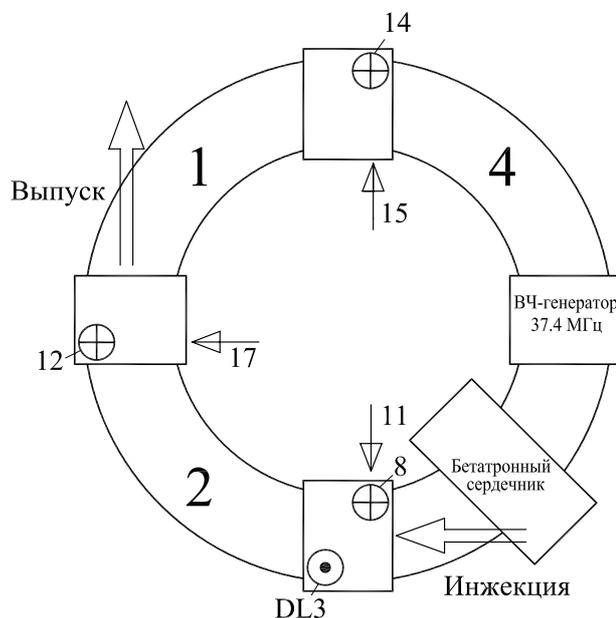


Рис. 4.17: Схема расположения пробников Б-4.

Для измерения амплитуды тока при ускорении в Б-4 используется магнитоиндукционный датчик [73] на основе пояса Роговского, расположенный в одном из прямолинейных промежутков. Особенности конструкции датчика тока обусловлены необходимостью измерения малых токов пучка (от 100 мкА) в условиях больших электромагнитных наводок, т.к. датчик находится в области сильных рассеянных полей от ведущего магнитного поля синхротрона и, кроме того, вплотную к нему распо-

жены два магнита сильноточной вертикальной 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 пазы, равномерно распределенные по окружности кольцевого каркаса. Внутри каркаса вклеен магнитный сердечник из стали ХВП, однородность которого обеспечивается навивкой его из ленты толщиной 80 мкм. Сечение сердечника $10 \times 20 \text{ мм}^2$. Датчик помещен в экран из проводящего материала, где ослабление поля происходит за счет наведенных токов, текущих в скин-слое. Экран имеет азимутальную щель, через которую вихревое поле пучка проникает к датчику без ослабления. Поле помехи ослабляется за счет проводящих стенок и глубокой щели. Экран состоит из 6 медных чашек с крышками, щель в поперечном сечении имеет вид улитки. Сигнал датчика интегрируется электронным интегратором, усиливается и передается на приемный дифференциальный усилитель. Полученный сигнал в каждом цикле измеряется аналого-цифровым преобразователем. В управляющем компьютере из измеренного сигнала вычитается сигнал помехи, записанный в рабочем режиме, но без пучка. Токи пучков, впускаемого в синхротрон и выпускаемого из него, выводятся на дисплей. Применение описанных мер по уменьшению влияния помех позволило измерять малые токи пучка в синхротроне.

Через один квадрант в прямолинейном промежутке, следующем за впускным, расположен инфлектор. Инфлектор Б-4 (см. рис. 4.18*а*), выполненный в виде двух пластин, осуществляет удар по пучку только электрическим полем. Верхняя пластина (3) состоит из двух половинок с зазором (4) между ними для того, чтобы обеспечить возможность для прохождения выпускаемого пучка. Они соединены между собой перемычками (2). Питание пластин осуществляется через вводы (1). Импульсы, пришедшие по кабелям от генератора, поглощаются согласующими нагрузками сопротивлением 50 Ом, в результате на пластины поступает только электрическая составляющая поля.

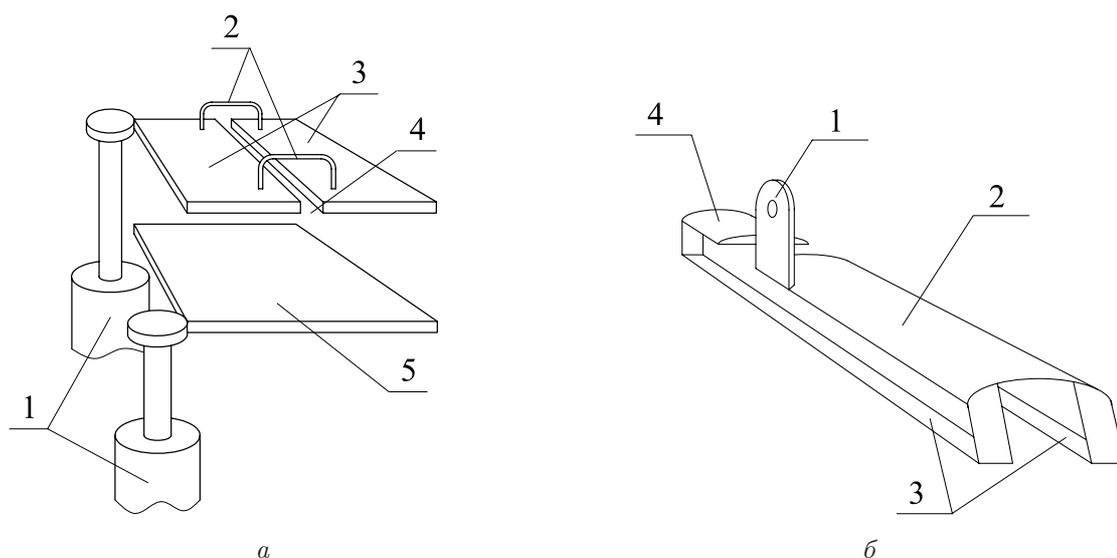


Рис. 4.18: Упрощенный чертеж инфлектора (*а*) и дефлектора (*б*) Б-4.

Выпуск производится также по вертикали, через выпускной магнит РМ1 и наклонный канал в железе магнитопровода. В силу специфики расположения Б-4 отно-

сительно накопителя ВЭПП-3, 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 (рис. 4.18б), представляет собой короткозамкнутую петлю. Такая конструкция необходима для удара по пучку магнитным полем. Путь протекания тока выглядит следующим образом: от кабельного ввода (не показан), подсоединенного к вводному контакту (1), ток по верхней шине (2) переходит к нижним шинам (3), а по ним — к заземленному контакту (4).

Так как часть апертуры по вертикали занята впускным и выпускным магнитами, инфлектором и дефлектором, то для полного 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.

4.8 Модернизация инжектора «Позитрон»

Эффективность работы комплекса ВЭПП-4 в режиме экспериментов по физике высоких энергий в большой степени определяется скоростью накопления позитронов в бустерном накопителе ВЭПП-3. 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 Б-4 и каналов транспортировки пучков, а также всех импульсных генераторов, питающих слаботочные корректирующие магниты;
- сконструирована и реализована система дополнительного охлаждения коммутатора Б-4;
- разработаны и изготовлены запасные блоки управления коммутацией Б-4;
- исследован тепловой режим нагрузок установки и осуществлен длительный прогон всех источников импульсного питания установки «Позитрон».

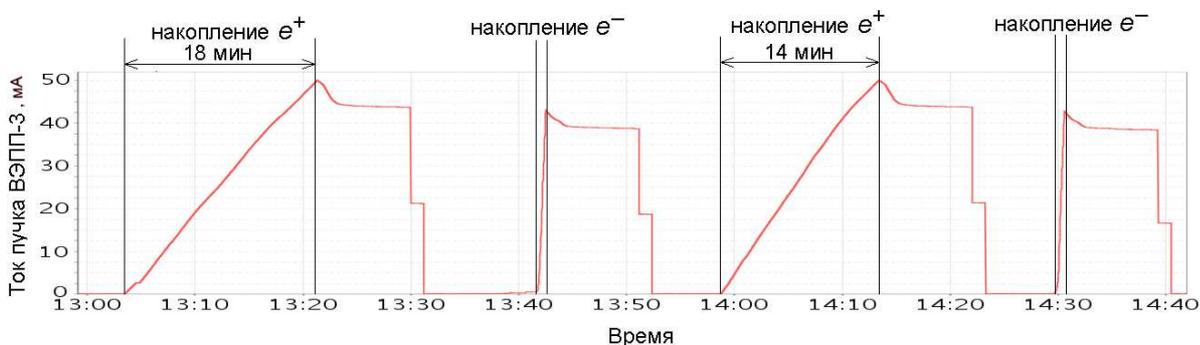


Рис. 4.19: Ток пучка ВЭПП-3 в зависимости от времени.

В результате достигнута средняя скорость накопления позитронов в бустерный накопитель ВЭПП-3 около 70 мкА/с. На рис. 4.19 приведен график тока пучка ВЭПП-3 в зависимости от времени. Как видно, для накопления пучка позитронов в двух сгустках с суммарным током 50 мА требуется около 15 минут. Заметный вклад в повышение

надежности 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 ВЭПП-3. В результате ускоритель ЭЛИТ-3А работает уже два года 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. Надежная работа инжектора «Позитрон» и бустерного накопителя ВЭПП-3 позволяет достигать светимости выше $1.5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на энергии ВЭПП-4М 1.8 ГэВ в долговременном режиме.

Работы по повышению надежности установки продолжаются. Принимаются меры по улучшению принудительного охлаждения сильноточных импульсных генераторов, питающих мощный источник электронов ЭЛИТ-3А, магнитов синхротрона Б-4 и канала транспортировки пучков, а также тиристорного отсека системы питания синхротрона Б-4.

5 Накопитель ВЭПП-3

5.1 Описание и параметры

Накопитель ВЭПП-3 [53] с длиной орбиты 74.4 м и максимальной энергией 2 ГэВ был построен в 1967 – 71 гг., модернизирован в 1986 – 87 гг. Оригинальным решением размещения оборудования как ВЭПП-3, так и ВЭПП-4М является подвеска его под потолком, что позволяет существенно сэкономить на сечении, а следовательно, на стоимости, тоннеля. Монтаж оборудования осуществляется со специальной передвижной управляемой платформы, оснащенной электрическим подъемником. Рис. 5.1 показывает подвеску магнитов под потолком тоннеля накопителя ВЭПП-3.

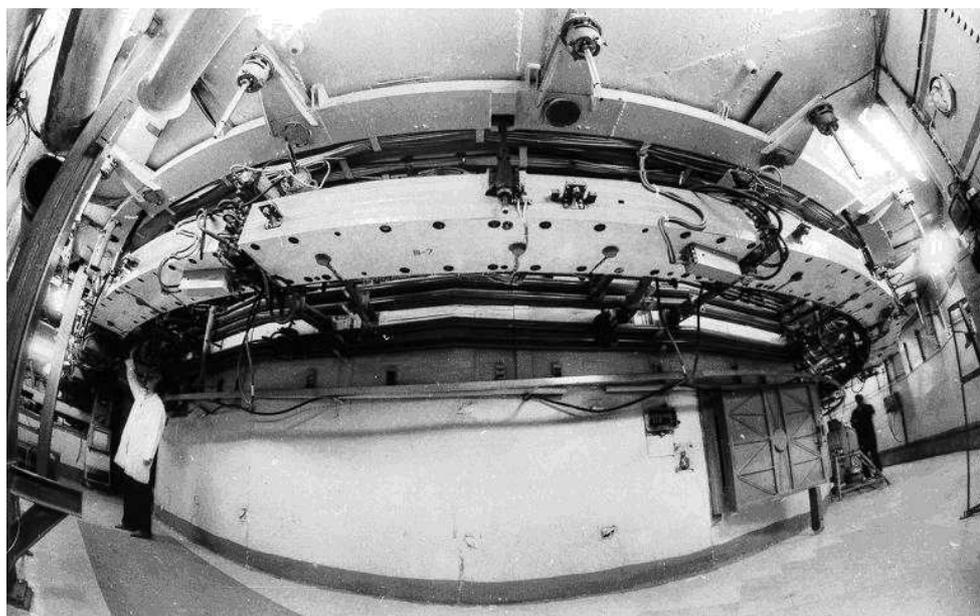


Рис. 5.1: Магнитные блоки ВЭПП-3, размещенные под потолком тоннеля.

Схематический план накопителя ВЭПП-3 изображен на рис. 5.2. Инжекция электронов и позитронов в ВЭПП-3 производится из установки «Позитрон». Магнитная система при этом переполюсуется, т.к. частицы движутся в одну сторону (против часовой стрелки). Максимальный накопленный ток электронов 500 мА, скорость накопления 2–5 мА/с. До максимальной энергии 2 ГэВ удается ускорить ток электронов до 160 мА, время ускорения около 4 мин. При частоте инжекции 1 Гц средняя скорость накопления позитронов — около 50 мкА/с, максимальный накопленный и ускоренный позитронный ток — около 50 мА. Повышение частоты инжекции до 1.5 Гц позволяет увеличить скорость накопления позитронов до 80 мкА/с, а максимальный накопленный ток — до 100 мА. Параметры накопителя ВЭПП-3 перечислены в таблице 5.1.

Основными задачами ВЭПП-3 в 2000 – 2010 годах являлись: инжекция электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-4М, генерация синхротронного излучения [54] и обеспечение экспериментов по ядерной физике на установке «Дейтрон» [55]. Кроме того, ранее электронный пучок ВЭПП-3 использовался для генерации когерентного излучения на лазере на свободных электронах типа «Оптический клистрон» [74, 75], в экспериментах на пучках рассеянных обратно комптоновских γ -квантов (установка РОКК-2) [76] и для тестирования аппаратуры детекторов с помощью тормозных γ -квантов, образующихся при рассеянии электронов на остаточном газе или на мишени в районе выхода из 1-го полукольца.

Таблица 5.1: Параметры ВЭПП-3.

Периметр	74.39 м	
Частота обращения	4030 кГц	
Энергия инъекции/выпуска/эксперимента	350/1800/2000 МэВ	
Бетатронные частоты	5.1 ÷ 5.2	
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	0.071	
Хроматизм*, гор./вер.	4.3 ÷ -2/-1.9 ÷ -1.5	
Параметры затухания, $J_x/J_y/J_z$	0.93/1.00/2.07	
Адмиттанс, гор./вер.	138/26 мм·мрад	
Апертура в полукольцах**, $2A_x \times 2A_y$	55 × 24 мм ²	
Расчетные параметры пучка		
	Инжекция	Эксперимент
Энергия	350 МэВ	2000 МэВ
Напряжение на ВЧ резонаторе***	3 кВ	500 кВ
Времена затухания $\tau_x/\tau_y/\tau_z$	870/820/390 мс	4.3/4.0/2.0 мс
Эмиттанс ε_x	0.009 мм·мрад	0.292 мм·мрад
Коэффициент бетатронной связи	1 ÷ 25%	1 ÷ 25%
Энергетический разброс σ_E	0.0125%	0.072%
Продольный размер σ_z	23.5 см	9.1 см
Потеря энергии на СИ за оборот	0.21 кэВ	246 кэВ****
Равновесная фаза ВЧ	175°	150°
Фазовая ширина сепаратрисы	4 ÷ 308°	30 ÷ 220°
Энергетический акцептанс $\Delta E/E$	0.59%	0.66%
Частота синхротронных колебаний	1.77 кГц	26.7 кГц
Время жизни пучка	0.5 ÷ 1.0 час	2 ÷ 5 час

* Измерения хроматизма без компенсирующих секступолей на энергии 350 МэВ.

** Апертура геометрическая в полукольцах при $\beta_x = \beta_y = 550$ см.

*** При энергии 350 МэВ работает резонатор с частотой 8 МГц, при 2000 МэВ — резонатор с частотой 72 МГц (см.ниже).

**** Вигглер для генерации синхротронного излучения включен.

5.2 Магнитная система

Для уменьшения числа «пустых» промежутков без поля и, тем самым, обеспечения предельной компактности ускорителя, полукольца состоят из 7 комбинированных магнитных блоков (структура каждого блока FB_1DB_2 по ходу пучка), содержащих фокусирующие и дефокусирующие секторы (рис. 5.3). Средний радиус полукольца $R = 8$ м. В секторах B_1, B_2 вертикальное магнитное поле однородно. Сектор D — полулинза с нейтральным полюсом, орбита пучка в которой проходит в области, где имеется как вертикальное поле, так и градиент, дефокусирующий пучок по радиусу. В секторе F поле того же знака, как в секторах B и D , а градиент фокусирует пу-

чок по радиусу. Все магнитные блоки обоих полуколец запитаны последовательно от мотор-генератора ГПН.

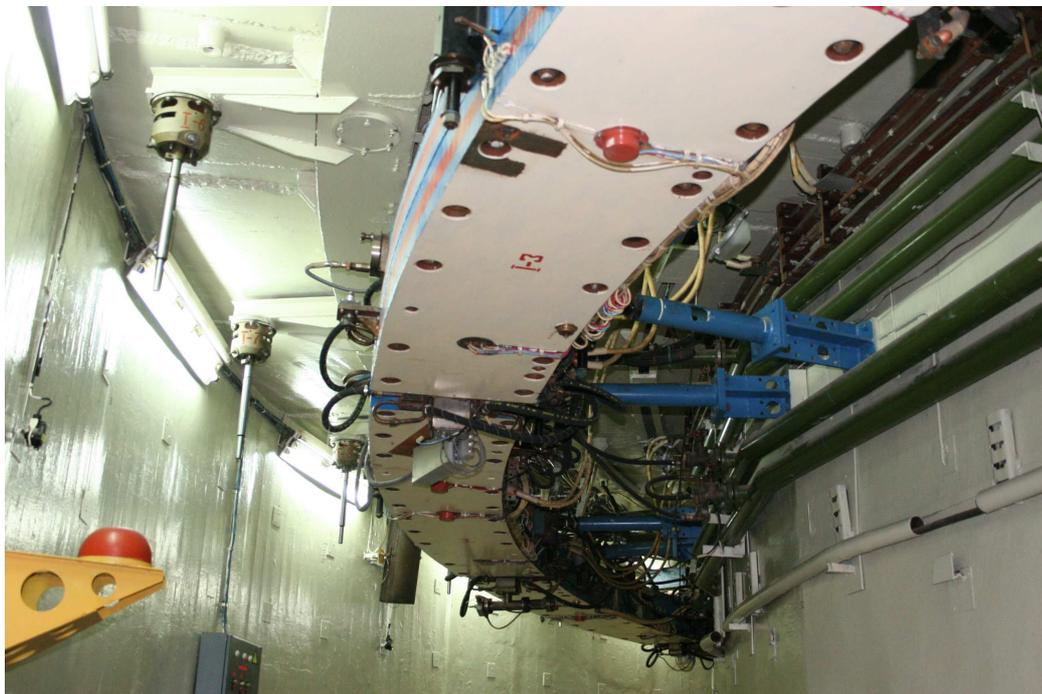


Рис. 5.3: Магниты полукольца ВЭПП-3. На стене тоннеля и на потолке видны элементы геодезической сети высокоточной выставки магнитных элементов.

Две вставки на концах полуколец, примыкающих к 4-му промежутку, состоят из отдельных магнитов и линз (структура вставки $FBODB$); магниты с однородным вертикальным полем, а линзы — с нулевым полем на орбите пучка. Все четыре магнита вставок питаются последовательно от выпрямителя ИСТ-М; так же последовательно питаются 4 линзы вставок.

Полукольца соединяются двумя длинными прямолинейными промежутками, длина каждого промежутка $L = 12$ м. В каждом промежутке — по 4 дублета линз; структура промежутка $O_1FDO_2FDO_3 + O_4FDO_2FDO_5$. (Здесь F и D обозначают фокусирующую и дефокусирующую по радиусу линзы, O_i — пустой короткий прямолинейный промежуток). Магнитная структура промежутка создает единичную матрицу как по горизонтали, так и по вертикали. Все линзы промежутков питаются последовательно и имеют одинаковую длину и один и тот же (по абсолютной величине) градиент. В этом случае для выполнения условия единичности промежутка требуются определенные соотношения между длинами:

- Длины обеих половин промежутка одинаковы.
- Расстояния между дублетами в каждой из половин промежутка одинаковы и равны четверти длины всего промежутка: $L_{FD} + O_2 = L/4$ (L — полная длина промежутка).
- Длины свободных промежутков O_1 и O_3 (а также O_4 и O_5) можно варьировать, сохраняя постоянной их сумму: $O_1 + O_3 = O_4 + O_5 = L/4 - L_{FD}$. Единичность промежутка при этом сохраняется, но оптические функции изменяются.

В 4-ом промежутке находится 3-хполюсный вигглер для генерации СИ. Интеграл поля по длине вигглера равен нулю.

На кольце имеются корректирующие элементы (обмотки, встроенные в основные магниты, и отдельно расположенные магниты) для контроля искажения замкнутой орбиты. Есть градиентные обмотки для коррекции бетатронных частот, а также, нелинейные магнитные элементы для компенсации натурального хроматизма и управления кубической нелинейностью магнитного поля.

В одном из промежутков расположен отдельный skew-квадруполь (квадрупольная линза, повернутая на 45° вокруг своей оси) для коррекции связи вертикальных и радиальных бетатронных колебаний.

Источники питания элементов магнитной структуры ВЭПП-3 перечислены в таблице 5.2.

Таблица 5.2: Источники питания магнитной системы ВЭПП-3.

Название	Тип	Кол-во	Что питает	I , А	U , В
H	ГПН	1	Магнитные блоки полуколец	16000	40
LL	ИСТ-М	1	Линзы промежутков	1200	200
4M	ИСТ-М	1	Магниты вставок	1800	45
4L	ИСТ-М	1	F- и D-линзы вставок	1800	45
WG	ИСТ-М	1	Вигглер	2000	45
2FD	ИСТ-М	1	Линзы промежутка «Дейтрон»	1200	45
2L45	ИСТ-М	1	Линзы 2D4 и 2F5*	1400	45
D, F	B-1000	2	D, F-коррекции полуколец	300	10
....	ВУР-25	11	Сильноточные коррекции	25	100
2G12	УШ**	1	Шунтирует линзы 2D1 и 2F2*	50	
2G78	УШ**	1	Шунтирует линзы 2D7 и 2F8*	150	
4XMB	ШИМ-25	1	Корректор магнитов вставок	25	100
....	УМ-4	56	Слаботочные коррекции	8	15

* Используется только для эксперимента «Дейтрон».

** Управляемый шунт.

В систему питания магнитных элементов ВЭПП-3 входят: мотор-генератор ГПН, питающий магнитные блоки полуколец [77]; тиристорные выпрямители ИСТ-М [78, 79], питающие линзы промежутков, магниты и линзы вставок, вигглер; выпрямители B-1000 [78, 79], питающие F- и D-коррекции полуколец; выпрямители ВУР, питающие сильноточные (с током до 25 А) обмотки коррекций; широтно-импульсный преобразователь ШИМ-25, питающий обмотки коррекций магнитов вставок; усилители мощности УМ-4 [80], питающие обмотки слаботочных коррекций (с током до 8 А); вспомогательные источники питания. Большая часть этих устройств была разработана и изготовлена в ИЯФ [81].

5.3 Ускоряющая ВЧ система

Высокочастотная ускоряющая система электрон-позитронного накопителя ВЭПП-3 описана в [82], основные параметры ВЧ системы приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3: Основные параметры ВЧ систем ВЭПП-3

Система	«8 МГц»	«72 МГц»
Частота	8.06 МГц	72.54 МГц
Гармоника частоты обращения	2	18
Число резонаторов	1	1
Максимальная амплитуда напряжения	20 кВ	800 кВ
Максимальная мощность генератора	20 кВт	120 кВт

Для обеспечения оригинальной инжекции в ВЭПП-3 со смещением пучка в продольном фазовом пространстве на накопителе установлены два высокочастотных ускоряющих резонатора — длинноволновый (8 МГц, рис. 5.4а), работающий во время инжекции, и коротковолновый (72 МГц, рис. 5.4б), ускоряющий частицы до энергии 2 ГэВ (на 2-ой и на 18-ой гармониках частоты обращения, соответственно).

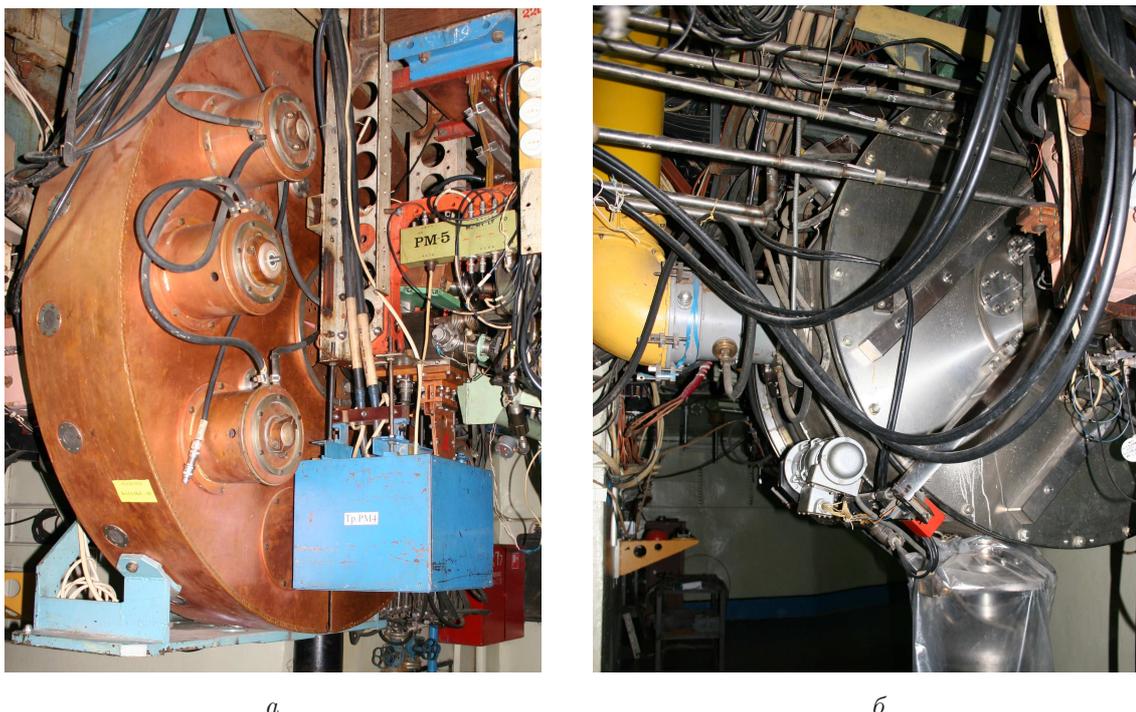


Рис. 5.4: Ускоряющие резонаторы 8 МГц (а) и 72 МГц (б).

Резонатор системы «8 МГц» выполнен не вакуумным, с сосредоточенными емкостями. По оси резонатора проходит керамическая трубка, составляющая часть вакуумной камеры накопителя. Ламповый генератор «Базальт-50» имеет максимальную мощность 20 кВт, которая подводится к резонатору по кабелю. Резонатор системы «72 МГц» — вакуумный, с распределенными параметрами. Ламповый генератор «Базальт-150» обеспечивает максимальную мощность 120 кВт, подводимую по коаксиальному фидеру. В системе возможна перестройка высших гармоник.

5.4 Вакуумная система

Вакуумная камера накопителя ВЭПП-3 [83] длиной 74 м изготовлена из нержавеющей стали со сварными соединениями. Система откачки содержит 25 сосредоточенных магниторазрядных насосов (МРН) общей производительностью около 2500 л/сек и 14 распределенных МРН в полукольцах, работающих на ведущем магнитном поле накопителя, общей производительностью около 1000 л/сек. Имеются также черновые насосы для предварительной откачки. Вакуумная камера оборудована ручными шиберами для изоляции различных участков. Для съема мощности синхротронного излучения в полукольцах имеются распределенные, а в промежутках — сосредоточенные приемники излучения, охлаждаемые водой.

Измерение вакуума осуществляется по току магниторазрядных насосов, имеется также несколько манометрических ламп. На рис. 5.5 показано окно программы контроля вакуума ВЭПП-3. Обычно средний по накопителю рабочий вакуум без пучка составляет $3 \div 5$ нТорр (в пересчете на азот N_2). Синхротронное излучение пучка вызывает десорбцию газа со стенок вакуумной камеры, что приводит к ухудшению вакуума в 2 – 3 раза при токе пучка около 100 мА. Давление остаточного газа P линейно зависит от тока пучка I :

$$P = P_0 + GI ,$$

где P_0 – давление без пучка, $G = \partial P / \partial I$ – газовыделение за счет фотодесорбции под действием синхротронного излучения.

На рис. 5.6 показана для примера зависимость давления остаточного газа от тока пучка, построенная по данным, записанным во время работы с синхротронным излучением на энергии 2 ГэВ, линейная аппроксимация дает следующие значения параметров: $P_0 = 5.22$ нТорр, $G = 0.11$ нТорр/мА.

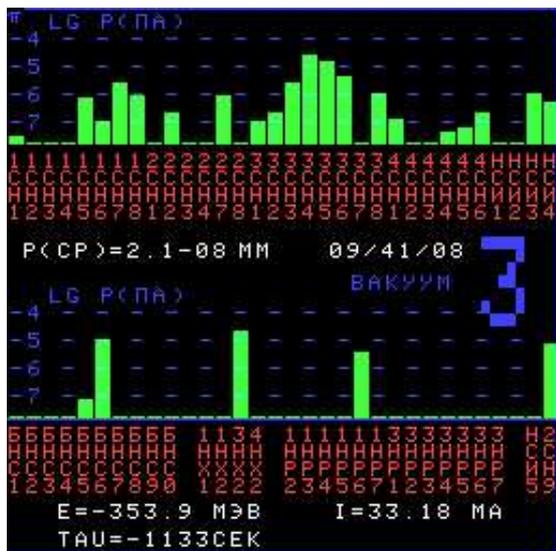


Рис. 5.5: Окно программы контроля вакуума.

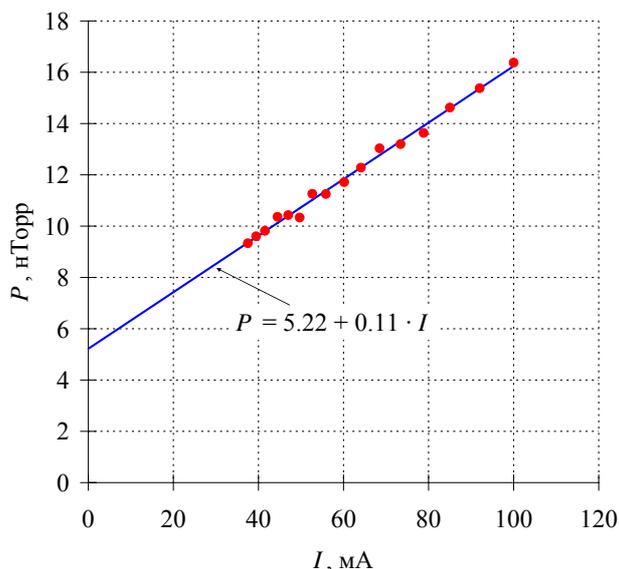


Рис. 5.6: Зависимость вакуума от тока пучка.

Время от времени происходят плановые вскрытия части вакуумной камеры для постановки нового оборудования, либо аварийные прорывы атмосферы во всю вакуумную камеру, поскольку вакуумная система ВЭПП-3 не оборудована быстродействующими клапанами для аварийной изоляции участка с течью. После каждого такого

события обязательной работой является обезгаживание вакуумной камеры синхронным излучением пучка; необходимо набрать интеграл тока пучка около 30 кКл (10 А·час) для обеспечения приемлемых условий эксперимента. Зависимость газовыделения от набранного интеграла тока пучка можно аппроксимировать степенной функцией, параметры которой зависят от начальных условий, в частности — от степени порчи вакуума перед началом обезгаживания. На рис. 5.7а показано уменьшение газовыделения G с набором интеграла тока $Q = \int I dt$ в двух сериях обезгаживания: после порчи вакуума до уровня 1 атм (красные кружки) и до 0.1 атм (синие треугольники). Учитывался только интеграл тока, набранный на энергии эксперимента. Максимальный ток пучка, который можно накопить и ускорить в ВЭПП-3 до энергии эксперимента 2 ГэВ, зависит от вакуума и, следовательно, от набранного интеграла тока, как показано на рис. 5.7б.

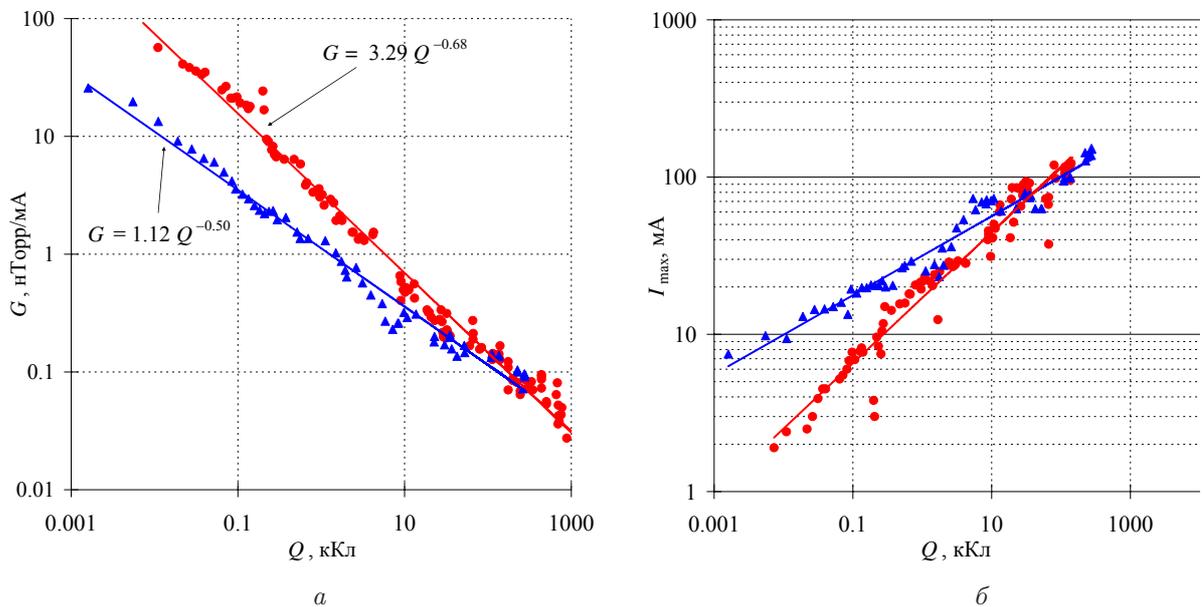


Рис. 5.7: Зависимость газовыделения (а) и максимального тока пучка (б) от накопленного интеграла тока после порчи вакуума до 1 атм (красные кружки) и до 0.1 атм (синие треугольники).

Экспериментально было обнаружено, что если набор интеграла тока прерывался на некоторое время, например, на выходные дни, то измеренные после такой остановки вакуум и газовыделение отличались от тех же параметров, измеренных до остановки, и требовалось некоторое время, чтобы вернуться к прежним параметрам. Этот эффект особенно заметен в начале процесса обезгаживания, когда газовыделение еще велико. Во время остановки остаточный газ перемещается из объема материала вакуумной камеры на ее поверхность, откуда при циркулирующем пучке удаляется синхротронным излучением.

Молекулярный состав остаточного газа в вакуумной камере ВЭПП-3 исследовался с помощью масс-спектрометра, установленного в 4-ом промежутке, в районе выпуска СИ. Измерялись парциальные давления остаточных газов с 6-ю массами: H_2 , CH_4 , H_2O , N_2 и CO , Ar , CO_2 ; заметного количества других газов не было обнаружено. Оказалось, что после вскрытия вакуумной камеры основную часть остаточного газа составляет вода, затем ее доля сравнивается с долей CO (N_2) и Ar .

5.5 Диагностика пучка

Настройка инжектированного пучка (система «первый оборот») производится по люминофорному датчику, расположенному после инфлектора, захват пучка в режим ВЧ-ускорения — с помощью ФЭУ, сигнал с которого подается на переключаемую нагрузку ($50 \text{ Ом} \div 100 \text{ кОм}$). Захват пучка наблюдается на осциллографе, при малых сопротивлениях нагрузки (50 Ом , 1 кОм) можно различать отдельные обороты.

Интенсивность циркулирующего пучка измеряется бесконтактным измерителем тока, который расположен рядом с керамической вставкой, закороченной емкостями на высоких частотах, чтобы блуждающие токи, текущие по вакуумной камере, не мешали измерениям. Постоянное напряжение с измерителя, пропорциональное току пучка, регистрируется интегрирующим аналого-цифровым преобразователем АЦП-20 (20 бит). Динамический диапазон устройства: $1 \text{ мкА} \div 1 \text{ А}$, уровень шума — около 5 мкА ; время усреднения — 1 мс , т.е. прибор измеряет средний ток, не различая отдельных сгустков.

Имеется 18 электростатических пикапов для измерения орбиты (подробнее см. Гл. 10). Рядом с каждым находится блок, содержащий предусилитель и коммутатор, подключающий поочередно электроды пикапа к общему кабелю, по которому сигнал передается к аппаратуре, измеряющей амплитуду импульса, наведенного пучком на пикап-электрод. Обработка измеренных данных и вычисление орбиты пучка производится в управляющем компьютере.

Для быстрых (пооборотных) измерений используется отдельный электростатический пикап, исключенный из системы измерений орбиты, который позволяет измерять токи в каждом из двух сгустков, а также частоты, амплитуды и фазы когерентных бетатронных колебаний пучка, возбуждаемых импульсом дефлектора (инфлектора) или инжекцией с неравновесными начальными условиями.

Полосковый пикап для измерения бетатронных частот методом резонансной раскочки пучка расположен в вакуумной камере промежутка. Сигнал снимается с пластин, повернутых на 45° относительно медианной плоскости накопителя (для того, чтобы наблюдать как горизонтальные, так и вертикальные колебания пучка), и подается на вход регистрирующей аппаратуры.

Несколько диагностических систем используют синхротронное излучение пучка в видимом диапазоне, отраженное зеркалом, и выводимое на оптическую скамью через стеклянное окно вакуумной камеры. Полупрозрачные зеркала разветвляют СИ на телекамеру, ПЗС-матрицу для наблюдения поперечных размеров пучка и диссектор, измеряющий продольное распределение частиц в сгустке.

Кроме того, в накопителе ВЭПП-3 имеется ряд подвижных, дистанционно управляемых пробников, которые позволяют определить орбиту пучка или известным образом ограничить апертуру накопителя.

6 Транспортировка пучков и системы впуска-выпуска

6.1 Инжекция, транспортировка и выпуск пучков

Электроны (позитроны) впускаются в ВЭПП-3 по вертикали на энергии 350 МэВ. Инжектируемый пучок входит в вакуумную камеру накопителя ниже медианной плоскости; кроме того, он смещен по фазе (по времени) относительно уже накопленного пучка. Инфлектор, расположенный там, где траектория впущенного пучка пересекает равновесную орбиту, практически гасит вертикальные бетатронные колебания впускаемого пучка. Поскольку передний фронт импульса инфлектора приходит после пролета накопленного сгустка, бетатронные колебания накопленного пучка почти не возбуждаются. Впущенный же сгусток совершает радиально-фазовые колебания, которые почти затухают к следующему импульсу инжекции (около 1 с).

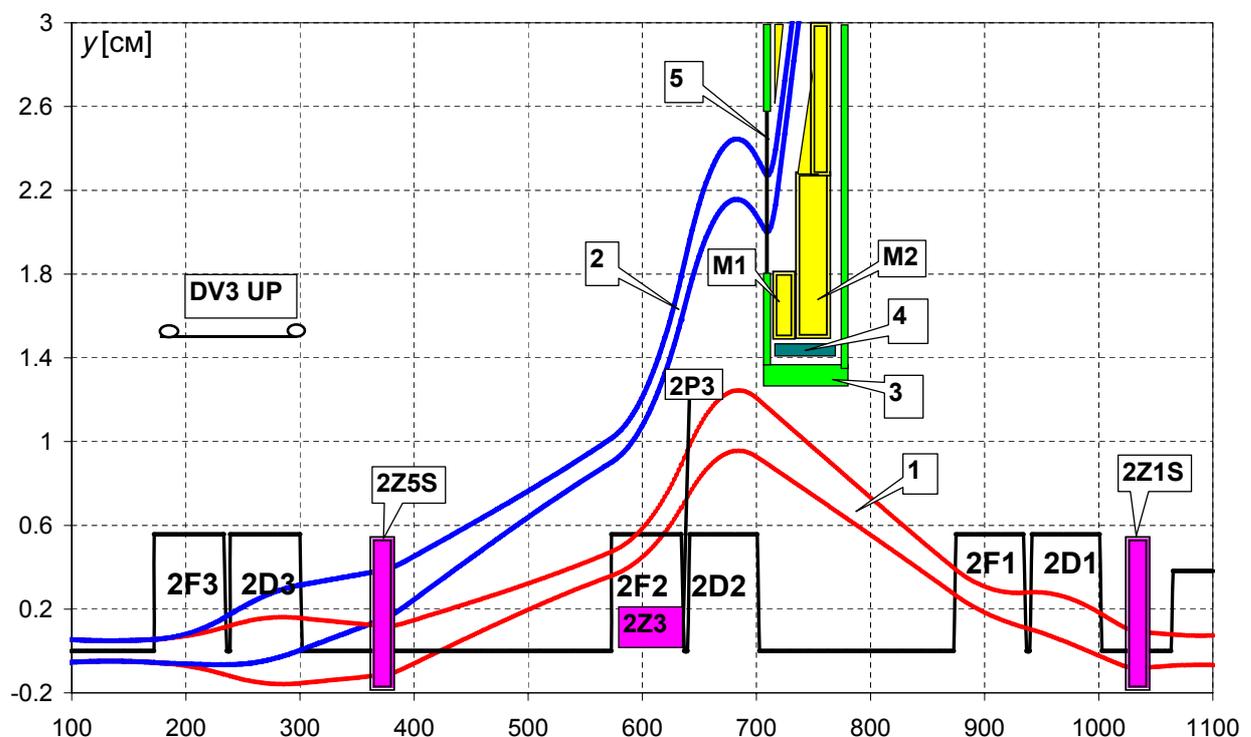


Рис. 6.1: Участок выпуска из ВЭПП-3: 1 – траектория пучка перед выпуском; 2 – траектория пучка после удара дефлектора; 3 – вакуумная камера; 4 – магнитный экран; 5 – выпускная бериллиевая фольга толщиной 200 мкм.

Выпуск пучка из накопителя ВЭПП-3 производится тоже по вертикали с помощью дефлектора, длительность импульса которого составляет около 120 нс по основанию, что позволяет поочередно выпустить из ВЭПП-3 оба циркулирующих в нем сгустка. Для уменьшения напряжения на пластинах дефлектора тремя корректорами создается вертикальное искажение орбиты на участке выпуска, как показано на рис. 6.1, так, что на азимуте выпускного магнита М1 пучок отклонен примерно на 10 мм. Положение пучка перед выпуском на рис. 6.1 показано после коррекции орбиты таким образом, что на датчике положения пучка 2P3 задано вертикальное смещение 8.4 мм, при этом время жизни пучка составляет более 20000 секунд. Вертикальный размер пучка показан на уровне $\pm 5\sigma_y$.

После выпуска пучок транспортируется по каналу [84] к электрон-позитронному коллайдеру ВЭПП-4М. Трасса канала достаточно сложна и определяется пятнадца-

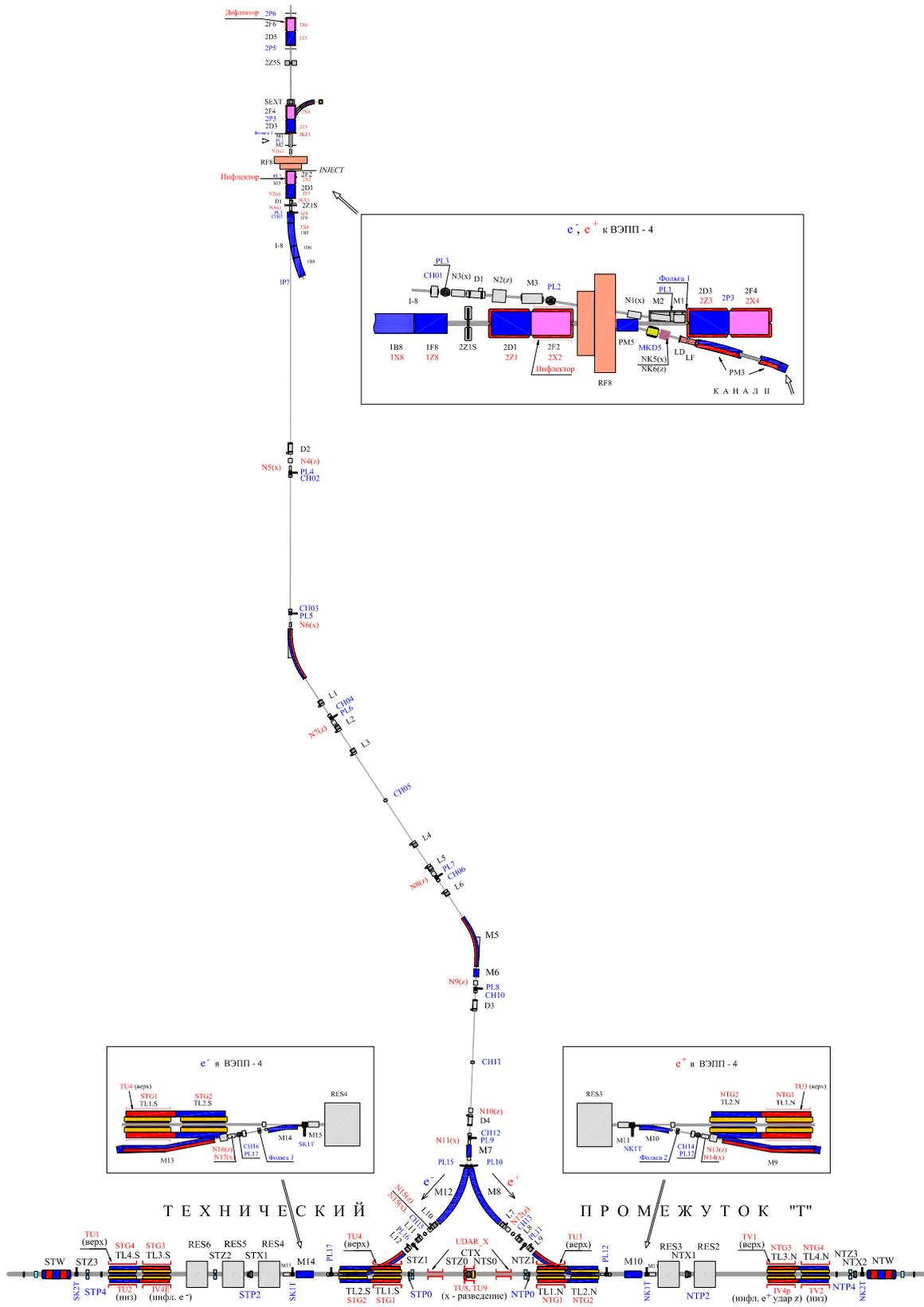


Рис. 6.2: Канал транспортировки пучков ВЭПП-3 – ВЭПП-4М.

тью горизонтальными и вертикальными поворотными магнитами, часть из которых осуществляет поворот одновременно в двух плоскостях. Протяженность трассы около 65 м, перепад высот 4 м. Оптическая структура канала ВЭПП-3 – ВЭПП-4М включает в себя импульсные магнитные элементы: поворотные магниты (горизонтальные и вертикальные), квадрупольные линзы и дипольные корректора (горизонтальные и вертикальные). Рис. 6.2 показывает схему канала, а рис. 6.3 – размещение магнитных элементов и размеры пучка (стандартное отклонение) при энергии перепуска 1.85 ГэВ.

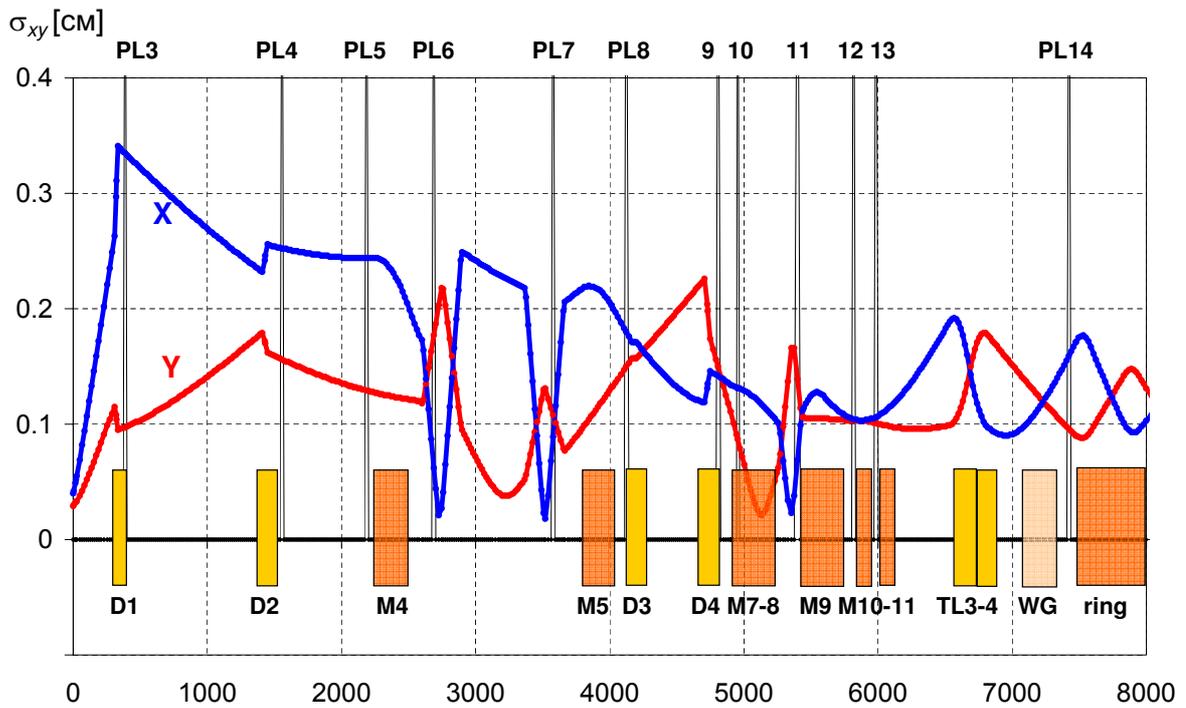


Рис. 6.3: Размер $\sigma_{x,y}$ пучка в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4М. PL3 – PL14 – люминесцентные датчики для настройки перепуска.

Пучок после удара дефлектора проходит через фольгу и попадает в апертуру магнита M1, центр которой отстоит от медианной плоскости ВЭПП-3 на 22.5 мм. Магнитами M1 и M2, расположенными в едином вакуумном объеме перед резонатором 8 МГц, пучок отклоняется вверх на угол около 10° , проходит через резонатор 8 МГц и попадает в магнит M3, установленный на линзе ВЭПП-3. После магнита M3 пучки электронов (позитронов), имея остаточный угол по вертикали 4.8° , с помощью ахроматической схемы, состоящей из двух 34-градусных магнитов M4, M5 и шести линз, параллельно переносятся на 10 м по горизонтали. Далее пучки электронов (позитронов) попадают на вход магнита-стрелки M7 который, совместно с 42-градусными магнитами M8-M9 (M12-M13), разводит электроны и позитроны в противоположном направлении (рис. 6.2).

Инжекция пучков электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-4М осуществляется на энергии $1.0 \div 1.85$ ГэВ снизу вверх под углом 11° . Септум-магниты M10, M11 выводят инжектированный пучок в медианную плоскость накопителя, а инфлектор IV4P помещает его на равновесную орбиту (рис. 6.4). Перед инжекцией делается компенсация разведения электронного и позитронного пучков с помощью магнитных корректоров таким образом, чтобы орбита впускаемого пучка совпадала с равновесной орбитой. На рис. 6.5 показана фотография участка инжекции электронных и позитронных пучков в кольцо ВЭПП-4М.

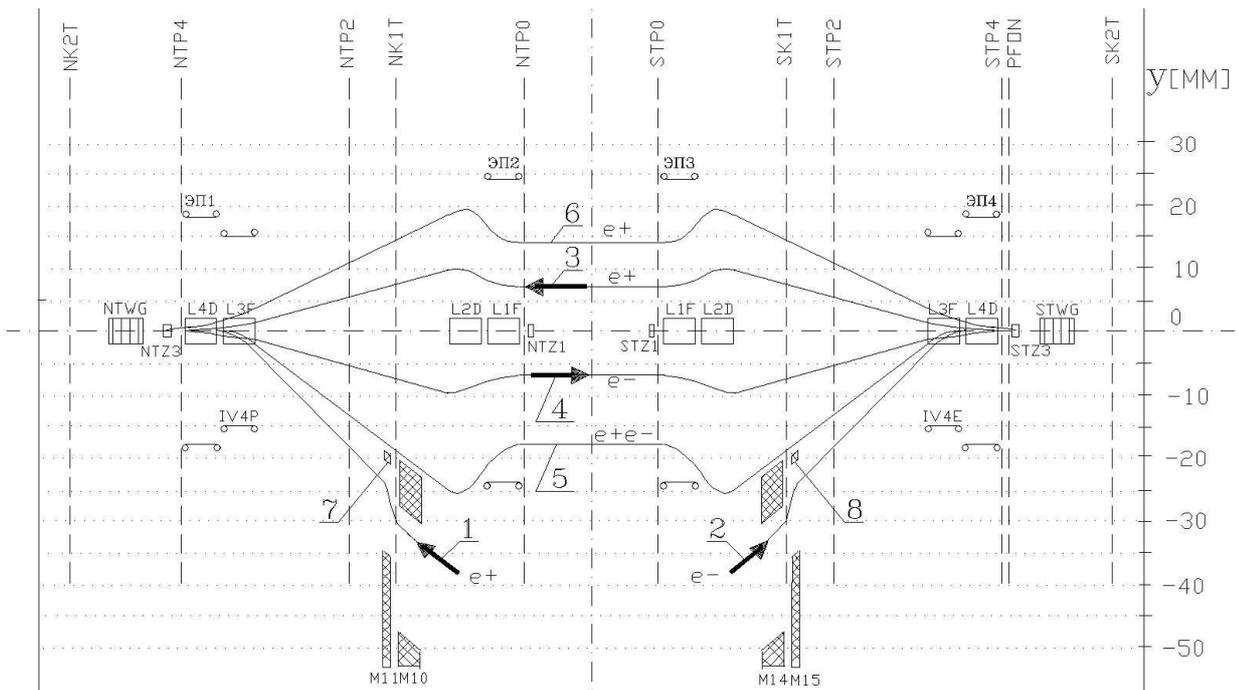


Рис. 6.4: Схема инъекции пучков в ВЭПП-4М: 1 — инъекция e^+ ; 2 — инъекция e^- ; 3, 4 — траектории циркулирующих пучков при включенном электростатическом разведении; 5 — траектория пучка e^- при инъекции e^+ ; 6 — траектория пучка e^+ при инъекции e^- .

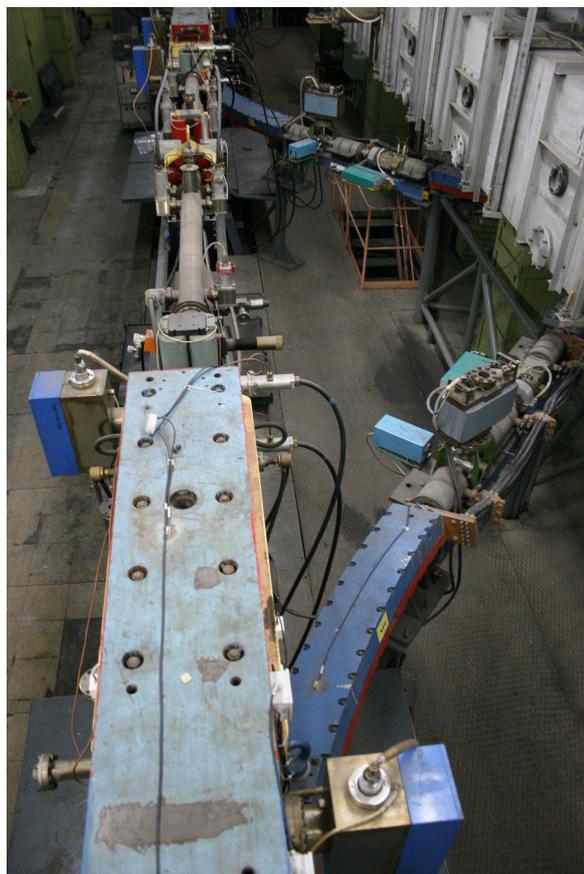


Рис. 6.5: Участок инъекции ВЭПП-4М.

Для питания импульсных магнитных элементов канала ВЭПП-3 – ВЭПП-4М и инжектора «Позитрон» используется около 70-и генераторов импульсных напряжений ГИМН [85]. Схема генератора с усилителем сигнала ошибки, сравнивающим значения опорного напряжения и напряжения обратной связи, снимаемого с резистивного делителя, обеспечивает зарядку емкостного накопителя до заданного напряжения и стабилизацию этого напряжения с точностью порядка 10^{-4} . Сильноточный ключ срабатывает от запускающего синхроимпульса и подключает емкостной накопитель к обмотке магнита.

Для измерения траектории пучка в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4М используются датчики тока изображения [86, 87]. Азимутальное распределение тока изображения, наводимого пучком в проводящих стенках вакуумной камеры, содержит информацию о токе пучка, положении его центра тяжести, а также о высших моментах поперечного распределения плотности пучка. Задача разработки «прозрачного» датчика положения и заряда одиночного сгруппированного наносекундного пучка возникла в связи с необходимостью заменить не вполне «прозрачные» вторично-эмиссионные датчики, значительное количество которых (более 10-и) приводило к заметным потерям тока пучка и увеличению его фазового объема. Кроме того, помимо положения пучка, полезно знать его полный заряд в той или иной части канала транспортировки для определения эффективности проводки пучка по каналу. Датчик имеет 8 линий распространения тока изображения, расположенных в разрыве вакуумной камеры равномерно по азимуту. Нагрузками линий являются первичные обмотки трансформаторов на ферритовых кольцах, вторичные обмотки которых подключены к диодам и, далее, к согласованным для высоких частот отрезкам коаксиальных кабелей. Внешний вид датчика со снятым экранирующим кожухом показан на рис. 6.6. Выпрямленные напряжения измеряются многоканальным регистрирующим устройством, оцифрованные данные передаются в управляющий компьютер для дальнейшей обработки. Траектория пучка в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4М, измеренная датчиками тока изображения показана на рис. 6.7, верхний график – по вертикали, нижний – по горизонтали; измеренный заряд пучка также показан на графике (желтые линии).

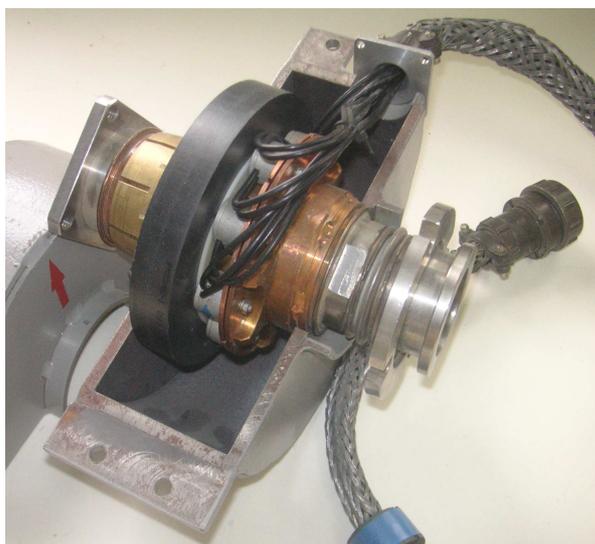


Рис. 6.6: Датчик тока изображения.

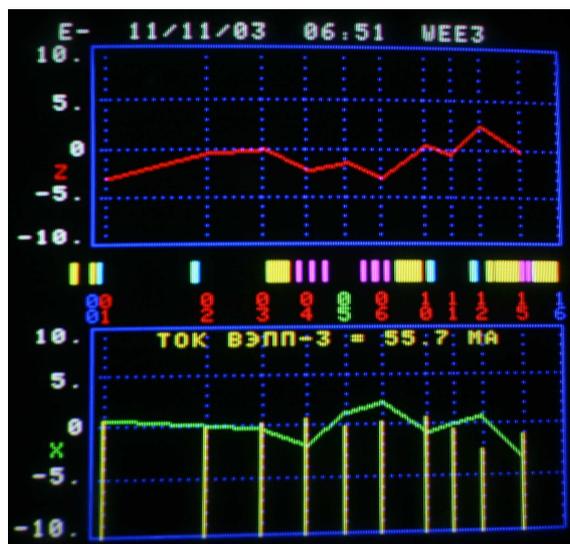


Рис. 6.7: Измеренная траектория пучка.

6.2 Устройства впуска-выпуска

Назначение системы впуска-выпуска — управление пучками заряженных частиц с помощью специальных наносекундных устройств — кикеров. Пластины кикеров располагаются внутри вакуумной камеры, на них подаются электромагнитные импульсы от наносекундных высоковольтных генераторов. В поле кикера частицы пучка отклоняются силой Лоренца. В различных режимах воздействие на пучок может быть электромагнитным (присутствуют обе компоненты поля) или только электрическим или магнитным (одна из компонент силы Лоренца равна нулю). Импульс, переданный пучку, устанавливает его на требуемую орбиту ускорителя или наоборот «выбивает» с нее для выпуска частиц из ускорителя.



Рис. 6.8: Внешний вид наносекундных импульсных генераторов.

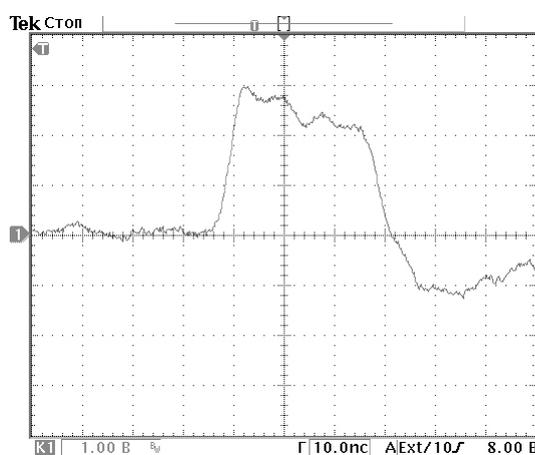


Рис. 6.9: Выходной импульс одного из генераторов.

В систему наносекундных устройств комплекса ВЭПП-4 входят несколько импульсных генераторов. Три наносекундных импульсных генератора (рис. 6.8) выполнены на основе газонаполненных искровых трехэлектродных разрядников и одинарных коаксиальных формирующих линий. Такой генератор обеспечивает максимальное напряжение 100 кВ, длительность импульса около 30 нс (рис. 6.9) и временная нестабильность не более 2 нс. С помощью первого генератора создается отрицательный импульс на пушке инжектора, вследствие чего возникает пучок электронов с энергией в десятки кэВ, который затем разгоняется линейным ускорителем до 50 МэВ. Второй и третий используются для питания инфлектора и дефлектора Б-4.

Импульсный генератор питания инфлектора ВЭПП-3 выполнен на разрядниках, с инвертором, обеспечивающим разнополярные импульсы на верхней и нижней пластинах. Инфлектор работает на бегущей волне (электромагнитная волна бежит навстречу движению пучка и обеспечивает равное по величине воздействие электрического и магнитного поля на пучок). Пластины инфлектора нагружены на согласованные нагрузки. Импульс имеет прямоугольную форму с максимальной амплитудой ± 40 кВ и длительностью 40 нс.

Два тиратронных генератора питают пластины дефлектора ВЭПП-3. Генератор работает на основе двойной формирующей линии. Пластины дефлектора короткозамкнутые, т.е. на пучок воздействует только магнитное поле от тока, текущего по пластинам. Импульс — колоколообразный с амплитудой ± 25 кВ и длительностью 150 нс.



Рис. 6.10: Генератор инфлектора ВЭПП-4М.

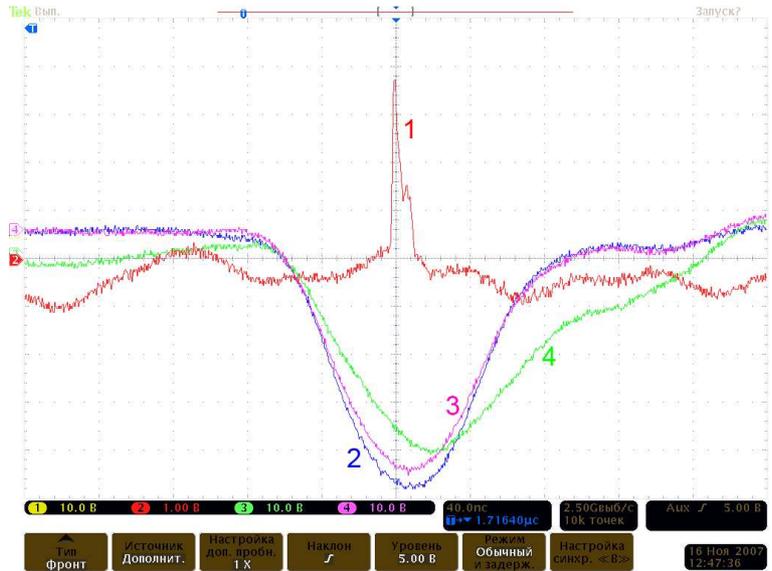


Рис. 6.11: Осциллограммы сигналов датчика тока пучка (1), дефлектора ВЭПП-3 (2,3) и инфлектора ВЭПП-4М (4).

Из-за отсутствия согласованных нагрузок на пластины дефлектора приходит серия импульсов убывающей амплитуды, отраженных от генератора, однако длины кабелей между генератором и пластинами подобраны так, чтобы воздействие отраженных импульсов на второй сгусток в ВЭПП-3 (если он есть) было минимальным.

Впуск в ВЭПП-4М выполняется с помощью позитронного и электронного инфлекторов. Питающие их генераторы также выполнены на тиратронах и двойных формирующих линиях (рис. 6.10). Поскольку протяженность сгустка частиц ВЭПП-4М по времени составляет менее 1 нс, для эффективной инжекции необходима точная синхронизация дефлектора ВЭПП-3 и инфлектора ВЭПП-4М. Для контроля этих устройств была спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию система наблюдения наносекундных импульсов. Импульсы напряжения на пластинах дефлектора ВЭПП-3, электронного и позитронного инфлекторов ВЭПП-4М (всего 6 сигналов) поступают по согласованным и точно подобранным по длине кабелям на четырехканальный осциллограф. Для контроля времени пролета пучка в канале установлен резистивный датчик интенсивности пучка. На рис. 6.11 приведен пример осциллограммы сигналов датчика пучка, дефлектора и инфлектора при согласованных временах. Для эффективного перепуска сигнал датчика пучка должен попадать на максимум импульсов дефлектора и инфлектора.

7 Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М

7.1 Основные параметры

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4, рассчитанный на максимальную энергию пучков до 6 ГэВ, был введен в эксплуатацию в 1979 году. В 1979 – 85 гг. на ВЭПП-4 с детектором МД-1 были проведены многочисленные исследования по физике Υ -мезонов и двухфотонным процессам. С целью повышения светимости коллайдера в 1986 – 94 гг. была проведена модернизация установки, включавшая:

- Введение зеркальной симметрии магнитной структуры относительно оси, проходящей через середины экспериментального и технического промежутков, позволившей уменьшить число источников питания.
- Организацию вставок в серединах полуколец с увеличенной апертурой и пластинами вертикального разведения для обеспечения работы в режиме 2 электронных на 2 позитронных сгустка, а также с возможностью вывода пучков СИ.
- Изменение магнитной структуры экспериментального промежутка для работы с продольным магнитным полем детектора КЕДР.
- Создание магнитного спектрометра для системы регистрации рассеянных в столкновении пучков электронов.
- Модернизацию установки РОКК-1М для получения пучка γ -квантов методом обратного комптоновского рассеяния.

Основные параметры коллайдера ВЭПП-4М, а также расчетные параметры пучка перечислены в таблице 7.1.

Таблица 7.1: Параметры ВЭПП-4М.

Периметр	366 м			
Частота обращения	818.924 кГц			
Бетатронные частоты, гор./вер.	8.54/7.57			
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	$1.68 \cdot 10^{-4}$			
Натуральный хроматизм, гор./вер.	-14.5/-20.3			
Апертура в полукольцах, $2A_x \times 2A_y$	$60 \times 30 \text{ мм}^2$			
Структурные функции в месте встречи $\beta_x/\beta_y/\eta_x$	75 см/5 см/80 см			
Расчетные параметры пучка				
Энергия, ГэВ	1.5	1.8	4.0	5.5
Синхротронная частота	0.011	0.012	0.017	0.021
Горизонтальный эмиттанс, нм·рад	17	25	121	230
Энергетический разброс	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
Потери энергии за оборот, кэВ	14	29	713	2550
Длина сгустка, см	5	5	5	5
Времена затухания (гор./вер.), мс	260/130	150/75	13.8/6.8	5.3/2.6

7.2 Светимость

Светимость при лобовом столкновении пучков рассчитывается по формуле

$$L = n f_0 \frac{N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} G, \quad (7.1)$$

где n — число сгустков частиц одного знака (электронов, позитронов), N — число частиц в сгустке, полагая, что токи всех сгустков одинаковы, f_0 — частота обращения, $\sigma_{x,y}$ — размеры пучка в месте встречи, G — фактор, учитывающий изменение поперечных размеров на длине сгустка (так называемый hour-glass эффект). Если длина сгустка σ_z примерно равна вертикальной бета-функции β_y ($\sigma_z \sim \beta_y \ll \beta_x$), то $G \approx 0.86$. Кроме того, надо учесть эффект динамической бета-функции: дополнительная фокусировка встречным пучком уменьшает $\beta_{x,y}$ (и, соответственно, поперечные размеры пучка) в месте встречи, тем самым увеличивая светимость. Этот эффект частично уравнивает влияние hour-glass, поэтому в первом приближении можно положить G равным единице и подставлять в формулу (7.1) невозмущенные размеры пучка.

Максимальный ток сгустка (или число частиц N) ограничивается эффектами встречи, силу которых можно оценить через некогерентные сдвиги бетатронных частот, обусловленные действием поля встречного пучка:

$$\xi_y = \frac{Nr_e}{2\pi\gamma} \frac{\beta_y}{\sigma_y(\sigma_x + \sigma_y)}, \quad \xi_x = \frac{Nr_e}{2\pi\gamma} \frac{\beta_x}{\sigma_x(\sigma_x + \sigma_y)}. \quad (7.2)$$

Здесь $\beta_{x,y}$ — бета-функции в месте встречи, r_e — классический радиус электрона, γ — релятивистский фактор. Размеры пучков вычисляются по формулам:

$$\sigma_y = \sqrt{\varepsilon_y\beta_y}, \quad \sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x\beta_x + (\eta_x\sigma_E)^2}, \quad (7.3)$$

где $\varepsilon_{x,y}$ — бетатронные эмиттансы, σ_E — относительный энергетический разброс, η_x — горизонтальная дисперсия в месте встречи. Для заданной структуры накопителя σ_x зависит только от энергии (линейным образом), в то время как вертикальный эмиттанс, а значит и вертикальный размер σ_y можно изменять с помощью скью-квадрупольных линз (коэффициента бетатронной связи). Расчетные параметры для коллайдера ВЭПП-4М составляют: $\beta_x = 75$ см, $\beta_y = 5$ см, $\eta_x = 80$ см, $\sigma_E = 1.7 \cdot 10^{-4} E[\text{ГэВ}]$, $\varepsilon_x[\text{см}] = 7 \cdot 10^{-7} E^2[\text{ГэВ}]$.

Поскольку максимальная светимость определяется в основном эффектами встречи, формулу для нее удобно переписать в следующем виде:

$$L = \frac{\gamma n I}{2er_e} \frac{\xi_y}{\beta_y} \left(1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right), \quad (7.4)$$

где I — ток сгустка (nI — полный ток пучка). При заданной энергии и $\sigma_y \ll \sigma_x$ горизонтальный сдвиг частоты ξ_x зависит только от N , поэтому предельный ток I_{\max} определяется максимальным значением ξ_x , а для получения максимальной светимости требуется также подобрать коэффициент связи (вертикальный размер пучка) таким образом, чтобы и ξ_y достиг предела по эффектам встречи. На самом деле, из-за эффектов встречи все равно происходит заметное увеличение σ_y , поэтому связь нужно всегда делать меньше «расчетной» — чтобы получить вертикальный размер пучка, соответствующий предельному ξ_y , уже с учетом его раздувания.

Нелинейность «линзы», которую представляет собой встречный пучок, приводит к тому, что бетатронные частоты частиц зависят от бетатронных амплитуд. На больших амплитудах, где линза слабая, они номинальные. На малых амплитудах частоты сдвигаются примерно на $\xi_{x,y}$, а если рассматривать весь пучок (все амплитуды), то на плоскости ν_x - ν_y бетатронные частоты покрывают некоторую область — так называемый футпринт (от англ. footprint). Выбор рабочей точки делается таким образом, чтобы футпринт не пересекался резонансами низких порядков; в противном случае пучок сильно раздуется, главным образом по вертикали, и светимость упадет.

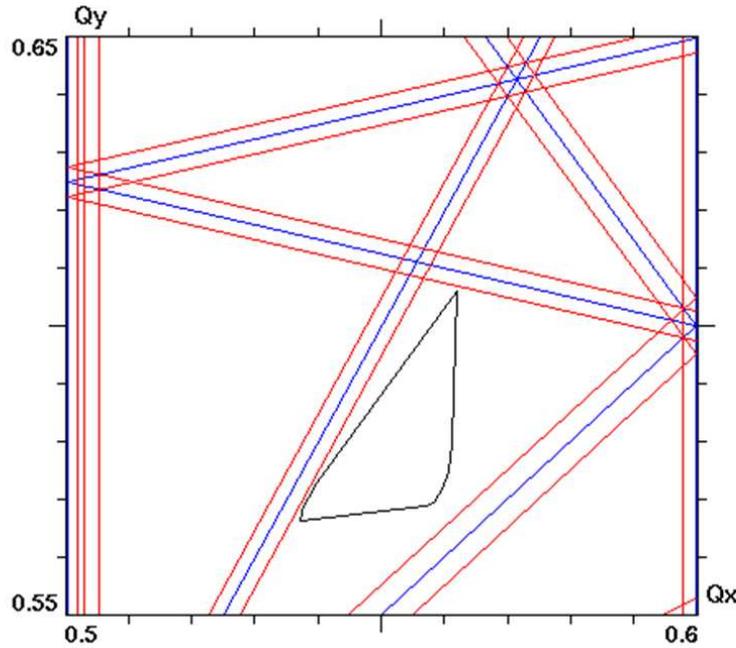


Рис. 7.1: Сетка резонансов и футпринт в плоскости бетатронных частот.

На рис. 7.1 показана сетка резонансов до 6-го порядка в области рабочей точки ВЭПП-4М, и собственно футпринт (черный контур). Бетатронные резонансы связи нарисованы синим цветом, их синхробетатронные сателлиты — красным. Линии резонансов определяются следующим образом:

$$L\nu_x + M\nu_y + N\nu_s = K, \quad (7.5)$$

где L, M, N, K — целые числа. Из-за зеркальной симметрии относительно медианной плоскости будут работать только резонансы с четными M , именно они и показаны на рисунке. Поскольку в магнитной структуре ВЭПП-4М имеется большая горизонтальная дисперсия в месте встречи, горизонтальная симметрия нарушается, и поэтому L могут быть как четными, так и нечетными.

Оптимальная рабочая точка (левый нижний угол футпринта) была выбрана таким образом, чтобы полуцелый резонанс был не слишком близко, и можно было вписать в свободное «окно» футпринт с максимальными размерами. В данном случае мы имеем: $\xi_x = 0.025$, $\xi_y = 0.04$, и дробные части бетатронных частот: $\nu_x = 0.537$, $\nu_y = 0.566$.

Наиболее опасным является основной резонанс связи (справа-внизу от футпринта). При приближении к нему растет вертикальный эмиттанс ε_y , и соответственно падает светимость, поэтому необходимо оставить там некоторый зазор. Таким образом, для того чтобы увеличить ξ_x (т.е. ток сгустка) нужно приподнимать рабочую точку, но

тогда придется уменьшать ξ_y , чтобы футпринт не приблизился к резонансу, расположенному выше. Это легко можно сделать, увеличив связь, но светимость при этом упадет в соответствии с (7.4). Отсюда можно заключить, что предельные значения для $\xi_{x,y}$ примерно соответствуют футпринту, показанному на рис. 7.1. Тогда, используя формулы (7.2) и соотношения между бета-функциями, получим $\sigma_y/\sigma_x \approx 0.04$. Далее, из (7.2) и (7.4) легко рассчитать предельные токи сгустков и максимальную светимость:

$$\begin{aligned} I_{\max}[\text{mA}] &= 0.48E^3[\text{ГэВ}] , \\ L_{\max}[\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}] &= 8.65 \cdot 10^{28}nE^4[\text{ГэВ}] . \end{aligned} \quad (7.6)$$

На энергии $E = 1.85$ ГэВ получаем предельный ток 3.04 мА и светимость $2.02 \cdot 10^{30}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (в режиме 2×2 сгустка). Дополнительные возможности состоят в незначительном изменении расчетной структуры накопителя. Так, перераспределяя декременты затухания с помощью специальных вигглеров в техническом промежутке, можно слегка увеличить горизонтальный размер пучка в месте встречи, и тем самым поднять предельный ток. Кроме того, помогает небольшое уменьшение β_y в месте встречи. Значительное уменьшение не имеет смысла, т.к. при $\beta_y < \sigma_z$ светимость начинает падать из-за hour-glass эффекта (уменьшается фактор G), а уменьшение длины сгустка при большом токе также не представляется возможным.

С учетом сделанных замечаний, экспериментальные данные довольно хорошо согласуются с расчетами. Так, на энергии 1.85 ГэВ были достигнуты предельные токи $3.1 \div 3.2$ мА в сгустке и светимость $2.3 \cdot 10^{30}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (в режиме 2×2 сгустка).

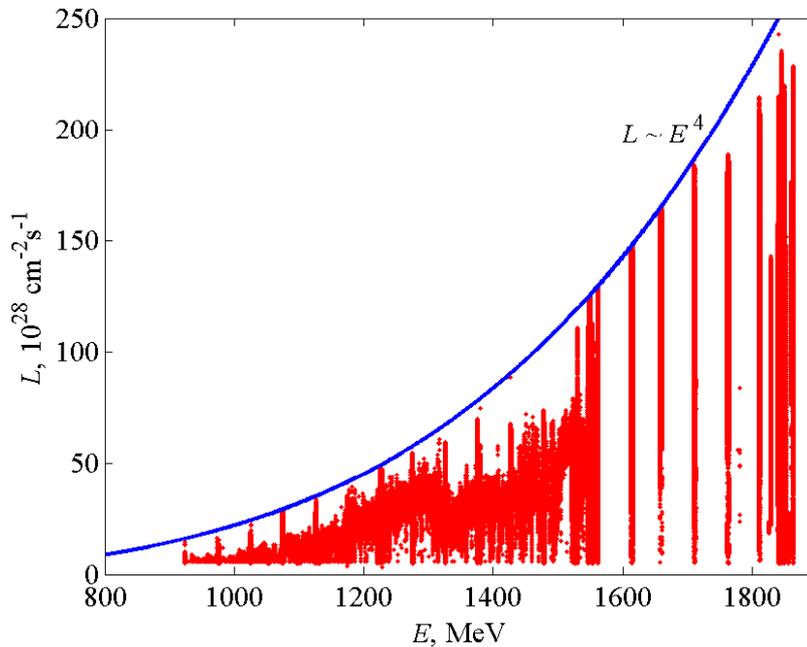


Рис. 7.2: Зависимость светимости ВЭПП-4М от энергии.

На рис. 7.2 точками показана измеренная светимость ВЭПП-4М, полученная в экспериментах по физике высоких энергий за 2000 – 2010 годы (все заходы). Как видим, максимальная светимость, действительно, с хорошей точностью пропорциональна E^4 (сплошная линия на графике). Провалы в измеренной светимости говорят о том, что при сканировании энергии некоторые области проходили быстро и не делали там основательной настройки режима.

При работе на высокой энергии предельные токи заметно вырастают. Так, согласно (7.6), получаем $I_{\max} \approx 20$ мА при $E = 3.5$ ГэВ и $I_{\max} \approx 30$ мА при $E = 4$ ГэВ. В настоящее время получение таких токов в двух сгустках представляется весьма проблематичным даже для электронов, не говоря уже о позитронах. Это означает, что ξ_x будет меньше предельного значения, поэтому рабочую точку можно опустить и увеличить ξ_y . Кроме того, предельные сдвиги бетатронных частот на высокой энергии слегка вырастают из-за увеличения декрементов затухания. Таким образом, ξ_y можно будет увеличить примерно до 0.05, но для этого потребуется значительно уменьшить бетатронную связь. В предположении, что это удастся сделать, из (7.4) легко рассчитывается увеличение светимости по сравнению с полученной на энергии 1.85 ГэВ.

Увеличение ξ_y и γ дает фактор 2.36 на 3.5 ГэВ и 2.7 на 4 ГэВ. Кроме того, остается фактор увеличения тока сгустка, но здесь нужно подставлять меньший (т.е. позитронный) ток, который можно оценить (с некоторой долей оптимизма) в 8 мА. Это соответствует току пучка ВЭПП-3 примерно 40 мА в сгустке (при стопроцентном КПД перепуска), или около 100 мА в двух сгустках при более реалистичном КПД. Таким образом, имеем еще фактор $8/3 \approx 2.67$ и максимальную светимость порядка $1.3 \cdot 10^{31}$ см⁻²с⁻¹ на энергии 3.5 ГэВ и $1.5 \cdot 10^{31}$ см⁻²с⁻¹ на энергии 4 ГэВ.

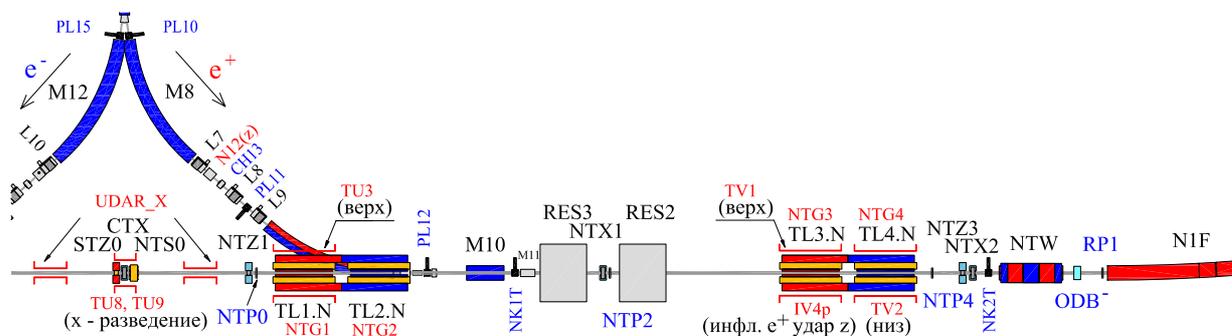
7.3 Магнитная система

Кольцо ВЭПП-4М состоит из технического промежутка, двух полуколец и экспериментального промежутка, см. схему на рис. 1.1. Магнитная структура ВЭПП-4М является зеркально-симметричной относительно оси, проходящей через центры экспериментального и технического промежутков. Большая ось ВЭПП-4М ориентирована с севера на юг, поэтому первая буква N в названии элемента означает, что он расположен в северной половине накопителя, а S — в зеркально симметричной южной. Фотография участка полукольца ВЭПП-4М показана на рис. 7.3.

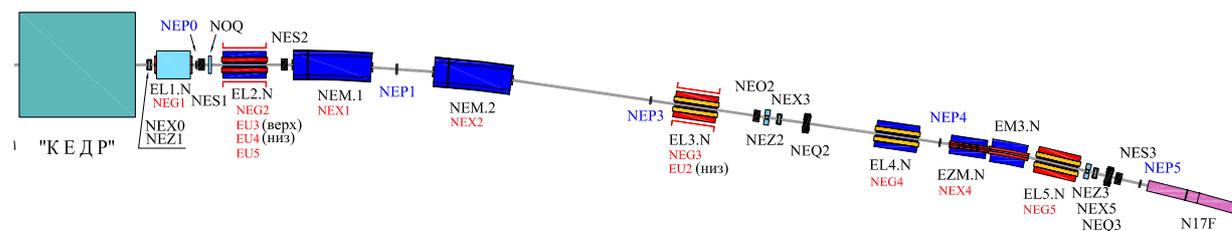


Рис. 7.3: Полукольцо ВЭПП-4М.

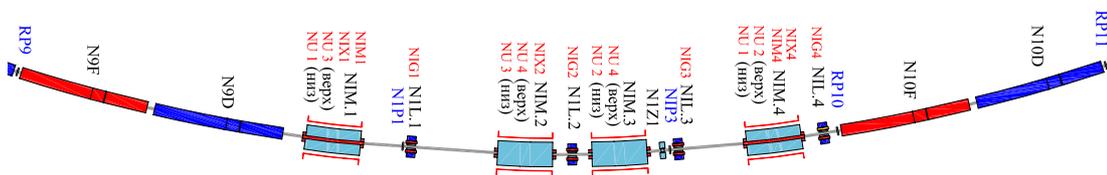
Описание магнитной структуры ВЭПП-4М в формате MAD-8 [88] можно найти на web-сайте ускорительного комплекса ВЭПП-4 [89]. Там же находятся входные файлы MAD-8 для расчета оптических функций и хроматизма, а также таблица структурных функций. Схемы размещения магнитных элементов ВЭПП-4М приведены на рис. 7.4, оптические функции различных участков — на рис. 7.5.



Технический промежуток; слева (элемент CTX) — центр промежутка, точка зеркальной симметрии. Виден конец инжекционного канала.



Экспериментальный промежуток; слева — детектор КЕДР, его середина является точкой зеркальной симметрии.



Вставка в N-полюльнике.

Рис. 7.4: Магнитная структура основных участков ВЭПП-4М.

Экспериментальный промежуток содержит набор квадрупольных линз для фокусировки пучков в месте встречи, секstupольные линзы для локальной компенсации хроматизма и ряд других магнитных элементов (корректоры орбиты и т.п.). Две пары дипольных магнитов, расположенных в экспериментальном промежутке, и квадрупольные линзы финального фокуса, установленные вблизи места встречи электронного и позитронного пучков, образуют распределенный жесткофокусирующий спектрометр для определения потерь энергии электронов и позитронов в экспериментах по двухфотонной физике. Для обеспечения требуемой светимости вертикальная бетатронная функция в точке встречи мала (порядка длины пучка) $\beta_y \simeq 5$ см. Горизонтальная бетатронная функция в месте встречи $\beta_x \simeq 70$ см. При этом в ближайшем к месту встречи дублету линз (линзы финального фокуса) амплитудные бетатронные функции достигают значений $\beta_{x,y} \simeq 120 \div 130$ м, что накладывает довольно жесткие ограничения на величину ошибок магнитного поля в этих линзах. Особенностью организации места встречи пучков в ВЭПП-4М является наличие ненулевой диспер-

сионной функции в месте встречи $\eta_x \simeq 80$ см (из-за магнитов спектрометра системы рассеянных электронов).

Магнитная структура технического промежутка оптимизирована с точки зрения получения эффективной инжекции электронных и позитронных пучков. В техническом промежутке также находятся ускоряющие ВЧ резонаторы и система электростатического разведения пучков в паразитном месте встречи.

Оптические функции полуколец представляет собой ФОДО структуру. В целях компактности ускорителя элемент периодичности полукольца представляет собой единый магнитный блок, состоящий из F - и D -магнитов, а также включающий обмотки коррекции — дипольной (по горизонтали и вертикали), градиентной, секступольной и skew-квадрупольной. Для работы в режиме 2×2 сгустка в полукольцах N и S сделаны вставки, в которых установлены системы электростатического разведения пучков. Во вставке N находятся каналы вывода СИ на станции пользователей и установлен вигглер для генерации интенсивных пучков рентгеновского излучения.

Существенными элементами структуры ВЭПП-4М являются магнитные «змейки». На концах экспериментального промежутка симметрично установлены две трехполюсные дипольные змейки NEZM и SEZM (длина — 110 см, межполюсной зазор — 29 мм) для управления размерами пучка. В техническом промежутке, в местах с нулевой дисперсией, находятся два 5-полюсных градиентных вигглера NTW и STW для перераспределения декрементов затухания продольных и поперечных колебаний.

Из-за больших значений бетатронных функций квадрупольные линзы финального фокуса выполнены с широкой апертурой: фокусирующие вертикально NEL1 и SEL1 — с апертурой $\varnothing 110$ мм, а фокусирующие горизонтально NEL2 и SEL2 — $\varnothing 170$ мм. Длина линз NEL1 и SEL1 составляет 100 см, NEL2 и SEL2 — 130.8 см. Остальные 14 квадрупольных линз, расположенные в прямолинейных промежутках, имеют вписанный диаметр апертуры $\varnothing 80$ мм и длину 128.7 см. Есть отдельные квадрупольные линзы и во вставках полуколец (4 в северной и 4 в южной). У этих линз диаметр апертуры $\varnothing 70$ мм и длина 29 см. Все квадрупольные линзы имеют дополнительные обмотки коррекции градиента. Поворотные магниты спектрометра (NEM1 и NEM2, SEM1 и SEM2) запитаны попарно от одного источника питания, имеют зазор 50 мм и длину 224 см. В этих магнитах размещены обмотки коррекции орбиты по горизонтали. Длина поворотных магнитов NEM3 и SEM3 — 112 см, межполюсной зазор — 30 мм. Поворотные магниты вставок полуколец NIM1 ÷ NIM4 и SIM1 ÷ SIM4 с длиной 158.5 см и межполюсным зазором 68 мм включены последовательно с питанием элементов периодичности. В этих магнитах имеется обмотка коррекции горизонтальной орбиты.

Кроме того, в магнитной структуре ВЭПП-4М имеется набор корректоров орбиты, секступольных, октупольных и skew-квадрупольных линз.

В систему питания магнитных элементов ВЭПП-4М входят тиристорные выпрямители ИСТ-М [78, 79], выпрямители В-1000 [78, 79], выпрямитель В-300, выпрямители ТИР, усилители мощности УМ-4 [80] и управляемые активные шунты линз вставок. Все источники питания кроме ИСТ-М разработаны и изготовлены в ИЯФ. Тиристорные выпрямители ИСТ-М существенно доработаны в ИЯФ для согласования с аппаратурой системы управления и улучшения точности и стабильности тока. Основные параметры источников питания магнитов ВЭПП-4М перечислены в таблице 7.2.

Таблица 7.2: Источники питания магнитной системы ВЭПП-4М.

Название	Тип	Кол-во	Что питает	I, A	U, B
H	ИСТ-М*	3	Магнитные блоки полуколец	6000	50
EL1, EL2	ИСТ-М	2	Линзы финального фокуса	2500	50
NEM, SEM	ИСТ-М	2	Магниты экспериментального промежутка	2500	50
EM3	ИСТ-М	1	Магниты экспериментального промежутка	2500	50
EZM	ИСТ-М	1	Дипольные змейки	2500	50
NIL, SIL	ИСТ-М	2	Квадрупольные линзы вставок	2500	50
FS1, FS2, DS1, DS2	ИСТ-М	4	Обмотки секступольной коррекции в магнитах полуколец	2500	50
NTW, STW	ИСТ-М	2	Градиентные вигглеры	2500	50
D7	ИСТ-М	1	Обмотки коррекции градиента в полукольцах	2500	50
F7	B-300	1	Обмотки коррекции градиента в полукольцах	± 300	18
EL3÷EL5	B-1000	3	Квадрупольные линзы экспериментального промежутка	1000	18
TL1÷TL4	B-1000	4	Квадрупольные линзы технического промежутка	1000	18
N(S)EX*, N(S)EZ*, N(S)ES*, N(S)EO*, N(S)EQ*	ТИР	11	Сильноточные корректоры орбиты, хроматизма, связи и нелинейности	± 20	50
**Z*, **X*, **G*	УМ-4	200	Слаботочные корректоры орбиты и структурных функций	± 8	16
NL1, NL2, NL4, SL1, SL2, SL4	УШ**	6	Активные шунты линз вставок	8	

* Три источника последовательно.

** Управляемый шунт.

Эксперименты по прецизионному измерению масс частиц предъявляют высокие требования к стабильности энергии пучков в коллайдере. Энергия пучка в циклическом ускорителе в первом приближении пропорциональна интегралу дипольного магнитного поля вдоль равновесной орбиты пучка:

$$\frac{E}{e} = \frac{c}{2\pi} \oint B(z) dz . \quad (7.7)$$

Основной вклад в интеграл поля вносят дипольные поворотные магниты. Таким образом, для проведения высокоточных экспериментов по физике высоких энергий требуется высокая стабильность магнитных полей в поворотных магнитах ВЭПП-4М.

Для долговременной стабилизации ведущего поля ВЭПП-4М и подавления пульсаций поля с периодом более 10 секунд, в системе питания магнитов создан дополнительный контур обратной связи по полю, в который был включен прецизионный ЯМР магнитометр [90]. Относительная точность измерений магнитного поля магнитометром составляет порядка нескольких единиц 10^{-7} . ЯМР магнитометр осуществляет измерения магнитного поля дополнительного магнита, аналогичного другим поворотным магнитам и включенного последовательно с ними. Цифро-аналоговый преобразователь формирует сигнал, пропорциональный полю, который подается на добавочные витки в катушке бесконтактного датчика тока. Сигнал датчика тока используется в цепи обратной связи для стабилизации источника тока, питающего магниты ведущего поля ВЭПП-4М. Полоса частот контура стабилизации составляет 0.1 Гц, диапазон регулировки поля — около $\pm 10^{-4}$.

Применение обратной связи по полю позволило уменьшить постоянную составляющую дрейфа величины ведущего поля примерно на порядок — до уровня 1 кэВ в сутки. На рис. 7.6 (верхний график) приведена временная зависимость ведущего поля, измеренного с помощью датчика ЯМР с выключенной и включенной обратной связью. Нижний график на рис. 7.6 демонстрирует в более мелком масштабе долговременную стабильность поля при включенной обратной связи. Значения поля даны в эрстедах, 10^{-3} эрстеда соответствуют 1 кэВ энергии частиц, циркулирующих в накопителе.

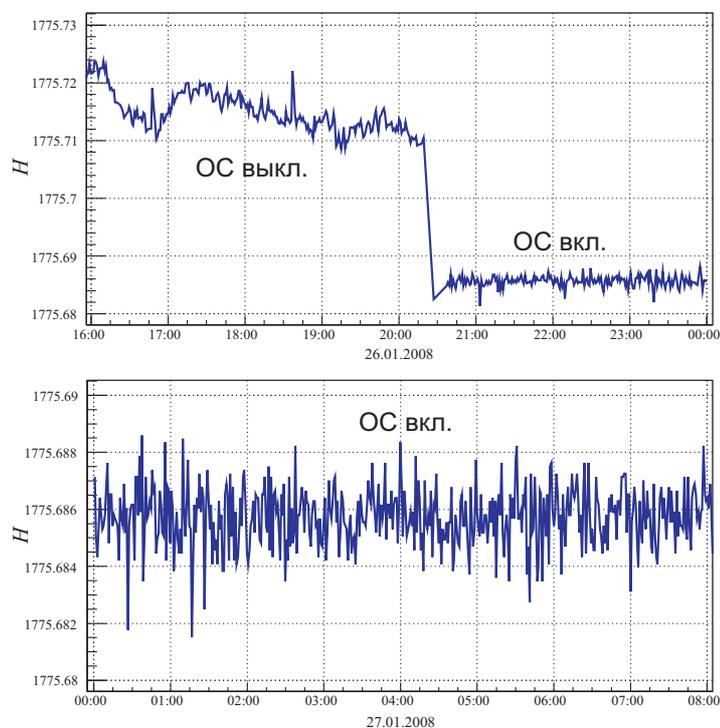


Рис. 7.6: Подавление пульсаций ведущего магнитного поля ВЭПП-4М.

После включения системы стабилизации выяснилось, что наблюдается остаточный дрейф поля, вызванный нестабильностью опорной частоты в блоке датчика ЯМР. Для устранения этого эффекта опорный генератор был синхронизован с рубидиевым стандартом частоты, обеспечивающим стабильность частоты лучше, чем 10^{-10} .

7.4 Ускоряющая ВЧ система

Ускоряющая ВЧ система [91,92] электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М работает на 222-ой гармонике частоты обращения. Блок-схема ВЧ системы приведена на рис. 7.7, проектные параметры перечислены в таблице 7.3.

Таблица 7.3: Параметры ВЧ системы ВЭПП-4М.

Частота ВЧ системы	181.1 МГц
Частота обращения пучка	818.924 кГц
Количество резонаторов	6
Шунтовое сопротивление резонатора	6.4 МОм
Макс. напряжение на одном резонаторе	1.0 МВ
Макс. мощность, рассеиваемая в одном резонаторе	78 кВт
Номинальная мощность ВЧ генератора	1000 кВт

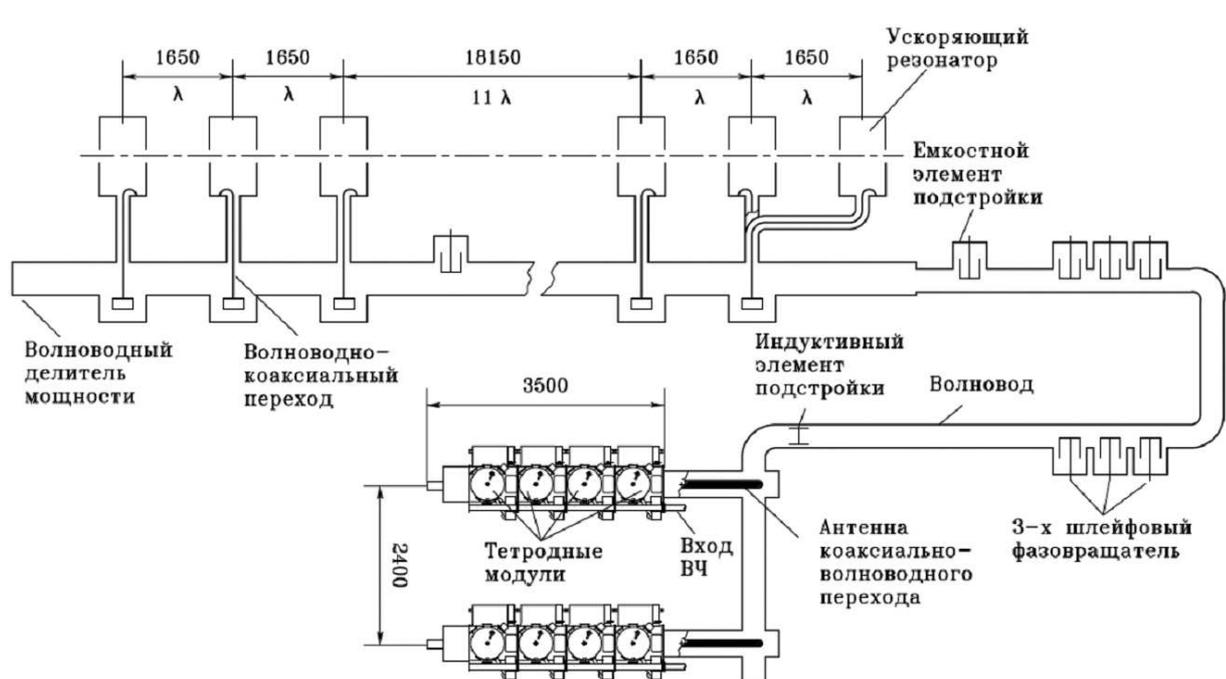


Рис. 7.7: ВЧ система ВЭПП-4М.

Для ускорения пучка до проектной энергии 6 ГэВ и компенсации потерь энергии на синхротронное излучение в коллайдере ВЭПП-4М предусмотрено 6 ВЧ резонаторов. Резонаторы с рабочей частотой 181 МГц были изготовлены в 1970-е годы. Внешний вид резонаторов, установленных на ВЭПП-4М, показан на рис. 7.8. Конструкция резонатора — двухкамерная (рис. 7.9). Внутренняя камера — это медный высоковакуумный резонатор, давление остаточного газа в котором не должно превышать $10^{-8} \div 10^{-9}$ Торр. Медный резонатор помещен в контейнер из нержавеющей стали, в котором поддерживается вакуум 10^{-6} Торр. Контейнер несет основную механическую нагрузку от атмосферного давления. Полная масса резонатора — около 5 тонн.

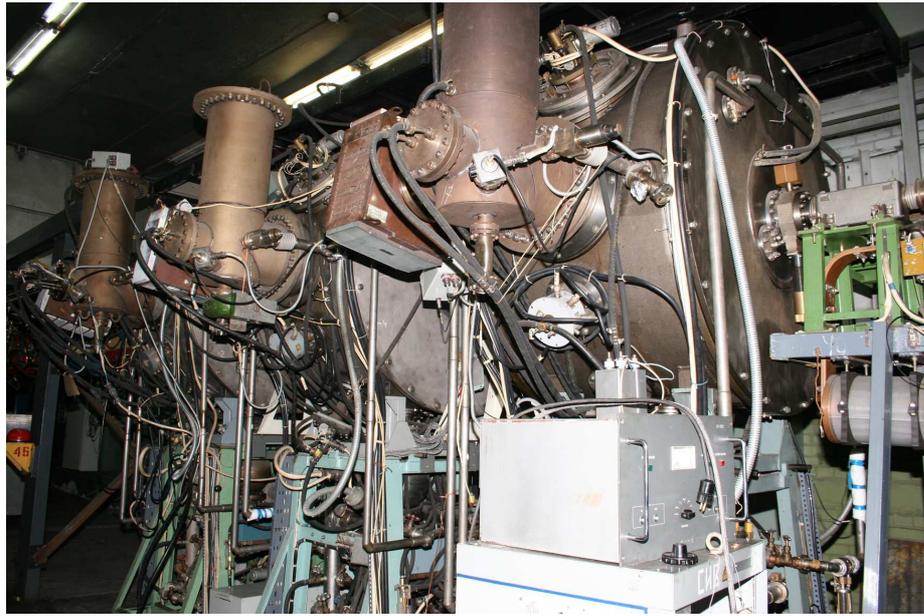


Рис. 7.8: Внешний вид резонаторов ВЭП-4М.

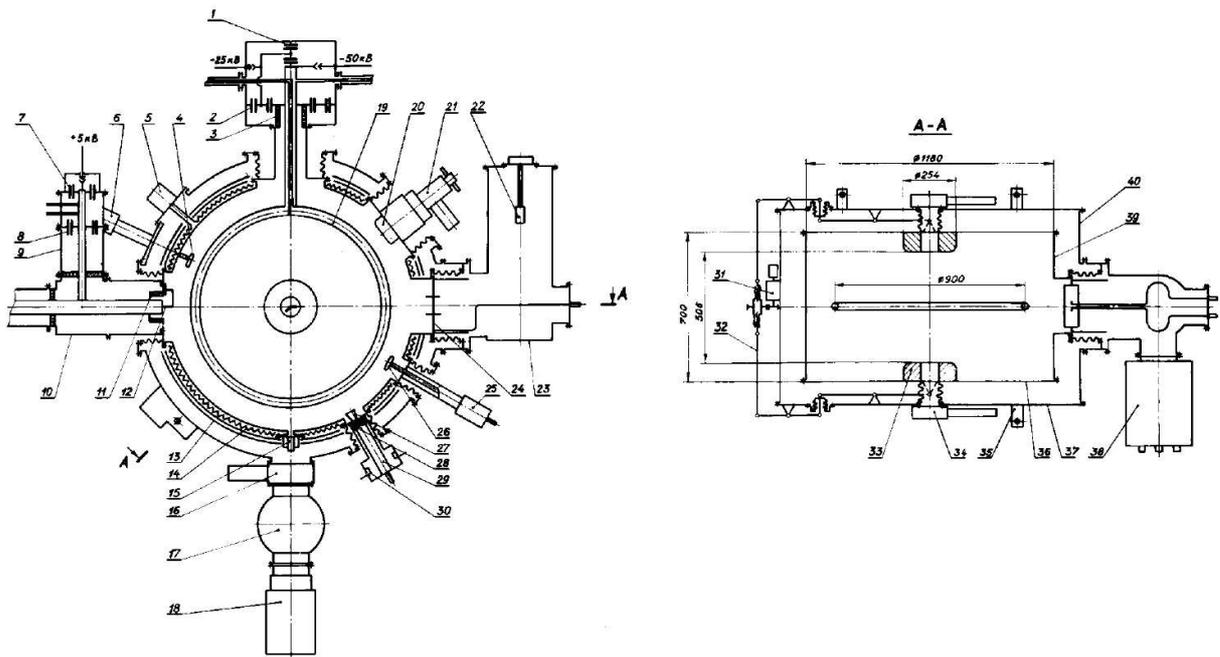


Рис. 7.9: Схематический чертеж резонатора 181 МГц: 1, 2, 7, 8 — блокировочные конденсаторы; 3, 11, 28 — керамические изоляторы; 4, 20, 26 — элементы подстройки высших мод; 6, 21, 25 — приводы подстройки; 5 — вывод нагревателей и термопар; 9 — четвертьволновый стакан; 10 — узел ввода мощности; 12 — петля связи; 13 — тепловые экраны; 14 — нагреватели; 15 — перепускной клапан; 16, 34 — вакуумные шиберы; 17 — азотная ловушка; 18, 38 — магниторазрядные насосы; 19 — противоразрядное кольцо; 22 — испаритель титана; 23 — сорбционный насос; 24 — электромагнитный экран; 27 — измерительная петля; 29 — отрезок коаксиальной линии; 30 — датчики направления; 31 — привод подстройки основной частоты; 32 — механизм подстройки; 33, 36, 39 — корпус резонатора; 37, 40 — вакуумный кожух; 35 — геодезические знаки.

Максимальное ускоряющее напряжение на резонаторе, полученное при испытаниях, составляет 1.85 МВ, рабочее напряжение — около 1.4 МВ.

ВЧ система ВЭПП-4М была разработана в конце 1980-х годов. Генераторы построены с использованием высокочастотных генераторных ламп ГУ-101А, работающих на частоте 181 МГц. В то время лампа ГУ-101А была самым мощным вакуумным электронным прибором в диапазоне до 200 МГц, выпускаемым отечественной промышленностью. Для того чтобы упростить и удешевить производство и монтаж ВЧ генераторов, была разработана модульная конструкция каскадов. Каскады собираются из трех модулей (рис. 7.10): ламповый модуль (1), модуль вывода мощности (2) и модуль перестройки частоты (3). Модули вывода мощности с одной стороны подключаются к выходному коаксиальному фидеру, а с другой стороны — к ламповому модулю. В каскаде может быть от одного до четырех ламповых модулей, что обеспечивает выходную мощность на частоте 181 МГц в непрерывном режиме 150, 300, 450, и 600 кВт, соответственно. Со свободной стороны последнего лампового модуля подсоединяется модуль перестройки частоты.

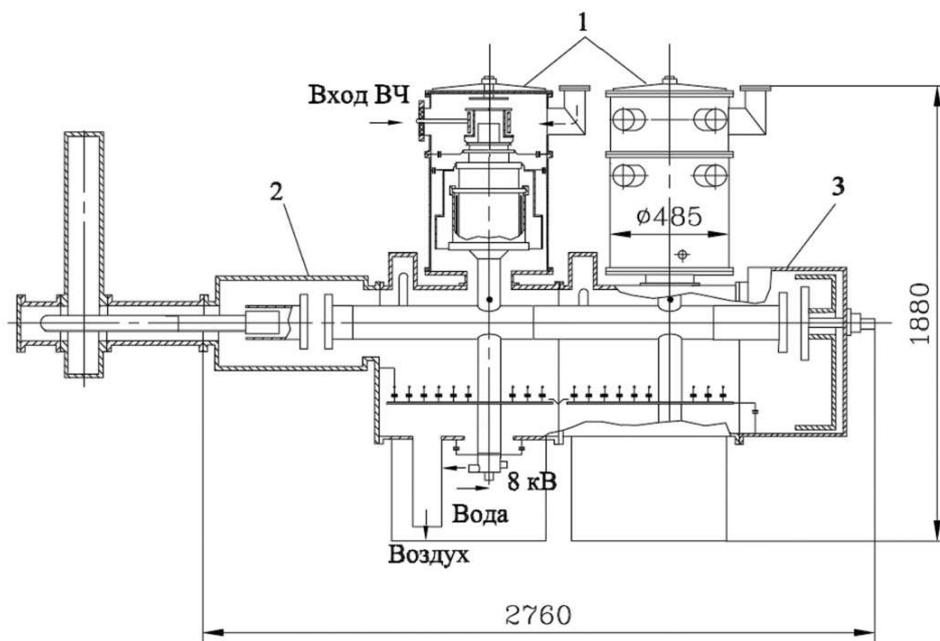


Рис. 7.10: Схематический чертеж генератора с двумя ламповыми модулями: 1 — ламповый модуль; 2 — модуль вывода мощности; 3 — модуль перестройки частоты.

В 2000 – 2010 годах ВЧ система коллайдера ВЭПП-4М была укомплектована пятью ускоряющими резонаторами. ВЧ генератор, включающий в себя выпрямители с быстродействующей защитой, предвыходные каскады и одну половину выходного каскада (четырёхламповый усилитель мощности на лампах ГУ-101А), обеспечивал напряжение ВЧ, достаточное для проведения экспериментов со встречными пучками на энергии 1.5 – 2.0 ГэВ. Выходная мощность ВЧ генератора в этой конфигурации составляет 500 кВт. Запланированная работа установки на энергии до 5.5 ГэВ потребует подключения второго усилителя мощности, чтобы довести выходную мощность ВЧ генератора до 1 МВт.

Для повышения стабильности частоты ВЧ разработан, изготовлен и установлен на комплексе новый задающий генератор высокой частоты с подключением к внешнему стандарту частоты. Проведенные измерения частоты ВЧ с новым задающим генера-

тором показали, что нестабильность частоты ВЧ в течение суток близка к пределу по разрешению измерительной аппаратуры и составляет не более чем ± 2 Гц, что соответствует нестабильности частоты обращения пучка около ± 0.009 Гц ($\Delta f_0/f_0 \approx 10^{-8}$).

7.5 Вакуумная система

Вакуумная камера ВЭПП-4М [83] выполнена из нержавеющей стали 1Х18Н9Т. Отдельные участки камеры соединены, преимущественно, с помощью сварки фланцев. Имеется относительно небольшое число соединений (в основном — каналы вывода синхротронного излучения) типа «клин-канавка» с фланцами, стягиваемыми болтами, и медной уплотняющей прокладкой между фланцами. Для компенсации термического расширения между поворотными магнитами арок размещены сифоны. Аналогичные компенсаторные сифонные узлы имеются и на прямолинейных промежутках. Для безопасного проведения работ с вакуумным оборудованием вдоль периметра ВЭПП-4М распределено около 30 ручных шиберов. Кроме того, имеется 4 автоматических пневматических шиберов с временем закрывания порядка 1 с. Рис. 7.11 показывает участок вакуумной камеры ВЭПП-4М в месте инъекции пучка, видны сварные соединения (1), сифоны (2), шиберы (3), магниторазрядные насосы (4) и другое оборудование.

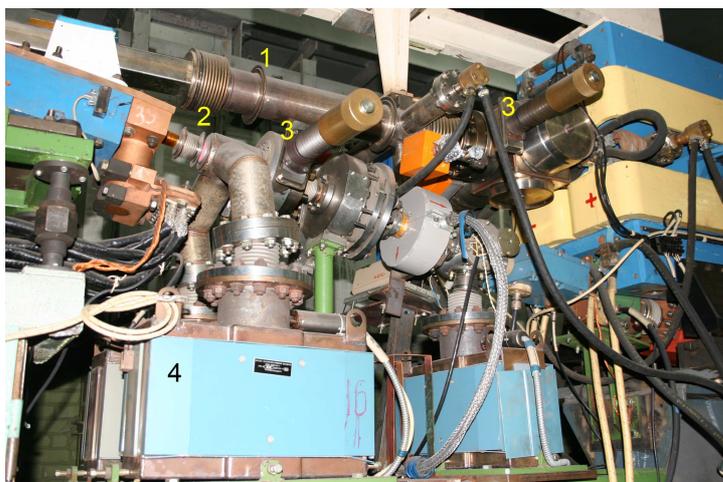


Рис. 7.11: Участок вакуумной камеры ВЭПП-4М.



Рис. 7.12: Окно программы контроля вакуума.

Получение требуемого вакуума обеспечивается сосредоточенными триодными магниторазрядными насосами типа ПВИГ-150 и МРН-150 (около 300 насосов) и 60 распределенными насосами, работающими в собственном поле поворотных магнитов арок. Характерный средний вакуум по результатам измерений при регулярной долговременной работе ВЭПП-4М равен 10^{-9} Торр.

Измерение давления остаточного газа в вакуумной камере ВЭПП-4М производится 20 вакууметрическими лампами типа ПММ-46, распределенными по кольцу. Результаты измерения оцифровываются и поступают в систему управления. Результат отображения вакуумной обстановки показан на рис. 7.12.

Синхротронное излучение поглощается набором распределенных медных охлаждаемых водой приемников, расположенных внутри магнитных блоков полуколец. Рас-

четное значение линейной плотности поглощаемой мощности СИ для таких приемников излучения составляет около 20 Вт/см, что представляется вполне достаточным для работы на высокой энергии с током в несколько десятков миллиампер. Во вставках полуколец, где ограниченное пространство не позволяет разместить длинные медные приемники излучения, поставлены сосредоточенные бериллиевые, способные выдерживать до 100 Вт/см² мощности СИ.

Четырнадцать каналов вывода СИ отсекаются от вакуумного объема ВЭПП-4М блоками с двумя бериллиевыми окнами толщиной 150 мкм каждая с охранным вакуумом между ними. Порт вывода СИ сделан медным моноблочным, охлаждаемым водой, с отверстиями, формирующими пучки СИ, 20 мм высотой и 40 мм шириной каждое.

7.6 Система электростатического разведения пучков

Коллайдер ВЭПП-4М работает со встречными электронными и позитронными пучками. При инжекции и подъеме энергии пучки разводятся по вертикали на достаточное ($> 10\sigma_y$) расстояние посредством подачи напряжения на пластины разведения (17 пар). Это напряжение подается по газонаполненным высоковольтным кабелям от выпрямителей, которые выполнены по схеме умножения напряжения с рабочей частотой 20 кГц [93]. Стабилизация выходного напряжения осуществляется за счет обратной связи. Максимальное выходное напряжение выпрямителей — до 30 кВ, точность поддержания выходного напряжения — не хуже 0.1%.

При переходе в режим эксперимента пучки должны быть сведены за минимальное время. В случае их медленного сведения (медленного снижения напряжения на соответствующих пластинах) нелинейные силы взаимодействия могут привести к гибели пучков. При каждом взаимодействии встречных пучков частицы получают отклонение в поле встречного сгустка около $2 \cdot 10^{-6}$ рад (в пересчете на полукольцо), в то время как граница апертуры — около 1 мрад. Таким образом, если время сведения превышает 500 оборотов (около 600 мкс), то возможны потери пучка. Быстрое сведение пучков осуществляется с помощью специальной схемы (рис. 7.13).

Схема управления положением пучков работает следующим образом. В режимах инжекции пучка и подъема энергии пластины разведения через коммутатор подключены к высоковольтным источникам EU3 и EU4, обеспечивающим выходное напряжение до 30 киловольт, при этом EU3 — положительной полярности, а EU4 — отрицательной. Для сведения пучков от системы управления поступает управляющее напряжение на замыкатель, который соединяет разнополярные цепи питания пластин, что приводит к снижению разности потенциалов между пластинами до нуля. За счет такой коммутации обеспечивается минимальное время разряда всех элементов (кабелей, выпрямителей, фильтр-нагрузок, пластин). Описанная схема обеспечивает сведение пучков за время порядка 40 микросекунд. Затем происходит переключение коммутатора, с помощью которого соединительные кабели подключаются к низковольтному источнику EU5, состоящему из двух разнополярных выпрямителей, выходное сопротивление которых намного ниже, чем высоковольтных. Выходное напряжение устанавливается заранее и подбирается таким образом, чтобы гарантировалось сведение пучков. Диапазон регулировки этого напряжения составляет ± 1.5 кВ, типичное напряжение, необходимое для точного сведения пучков — порядка 100 В.

Измеренное значение вертикального размера пучка при включении сведения показано на рис. 7.14. Верхняя линия на графике соответствует положению центра тяжести

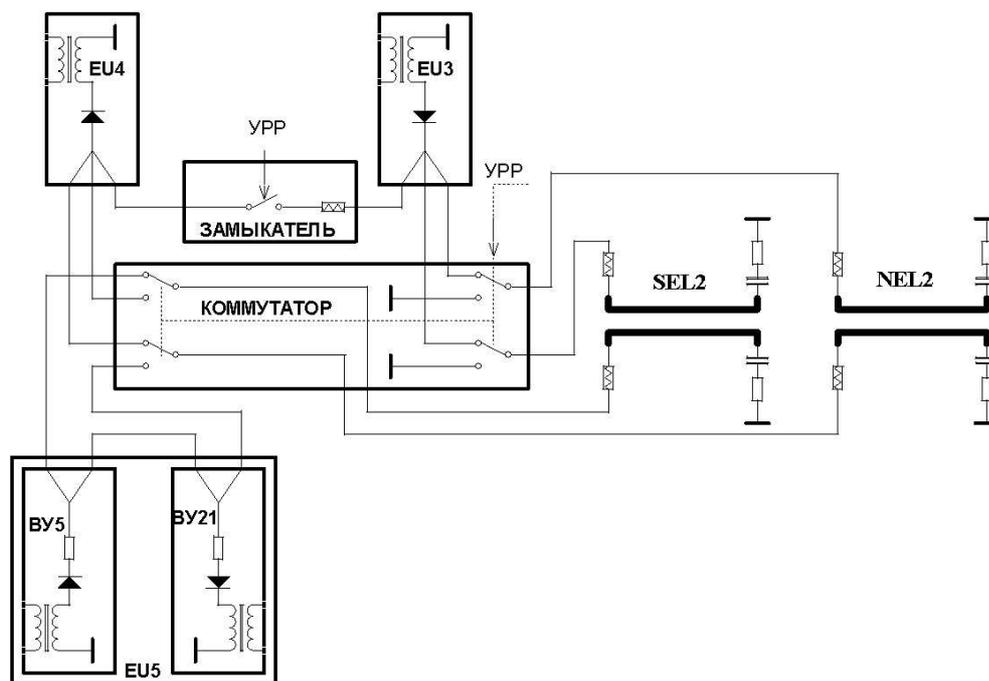


Рис. 7.13: Схема быстрого сведения пучков: EU3 и EU4 — высоковольтные источники питания; EU5 (ВУ5 и ВУ21) — низковольтные источники питания; Замыкатель — высоковольтное устройство для замыкания цепей питания разведения; Коммутатор — высоковольтный коммутатор для переключения питания пластин разведения; SEL2 и NEL2 - пластины разведения в соответствующих линзах; УРР — внешнее управление.

пучка (вне области сведения), нижняя — среднеквадратичному размеру. Как видно на рис. 7.14, существующая система быстрого сведения пучков не приводит к серьезным возмущениям их динамики.

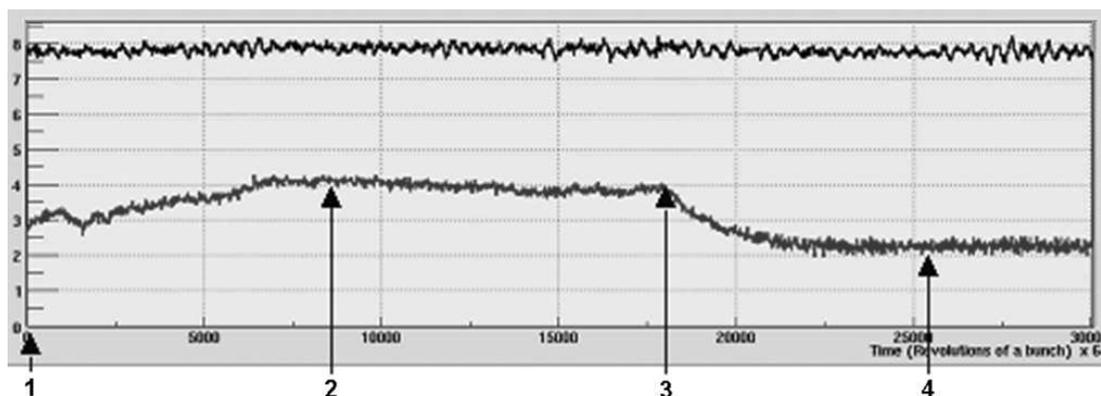


Рис. 7.14: Изменение вертикального размера пучка при сведении: 1 — начало сведения пучков, 2 — пучки разведены на $0.5\sigma_y$, 3 — включение точной подстройки сведения, 4 — пучки сведены полностью. Одно деление горизонтальной шкалы соответствует 0.39 с. Одно деление вертикальной шкалы равно 0.2 мм.

При разведении пучков также необходимо быстрое установление напряжения на пластинах для того, чтобы пройти то же критическое расстояние за минимальное время. Это обеспечивается следующим образом. При переключении коммутатора в режим разведения к кабелям, идущим к пластинам и находящимся под низким по-

тенциалом сведения, подключаются кабели, соединенные с выходами высоковольтных источников питания, на которых к этому моменту уже установлено напряжение разведения и, соответственно, эти кабели заряжены до этого напряжения. Несмотря на то, что длина последних кабелей значительно меньше, чем первых, соотношение их емкостей является достаточным для того, чтобы обеспечить необходимый «скачок» напряжения на пластинах. Выходное сопротивление выпрямителей не оказывает существенного влияния, так как оно достаточно высоко (более 1 МОм).

7.7 Геодезический мониторинг

Для кольцевых ускорителей с сильной магнитной фокусировкой нет необходимости требовать высокой точности выставки магнитных элементов ($0.05 \div 0.1$ мм) на всем периметре ускорителя, достаточно сделать это на участках порядка длины волны бетатронных колебаний. При этом кривая, относительно которой размещаются магниты и базирующаяся на них вакуумная камера, ограничивающая апертуру, может существенно (на миллиметры) отличаться от проектной орбиты. Эта сглаживающая кривая, определяющая замкнутую орбиту, должна удовлетворять следующим условиям:

- она должна так аппроксимировать результаты измерений, чтобы число необходимых подвижек элементов было минимальным;
- она должна вызывать наименьшее искажение орбиты пучка.

Для выполнения последнего условия сглаживающую кривую можно строить как сумму гармоник Фурье, к которым магнитная структура наименее чувствительна. Именно этот алгоритм выбран для точной геодезической выставки магнитных элементов ВЭПП-4М. На рис. 7.15 показано положение геознаков ВЭПП-4М по горизонтали согласно съемке 2003 года. Большинство геодезических знаков лежат на сглаживающей кривой с отклонением не более 0.1 мм. Коррекции требуют небольшое количество знаков (показаны на рисунке), а следовательно, и магнитных элементов.

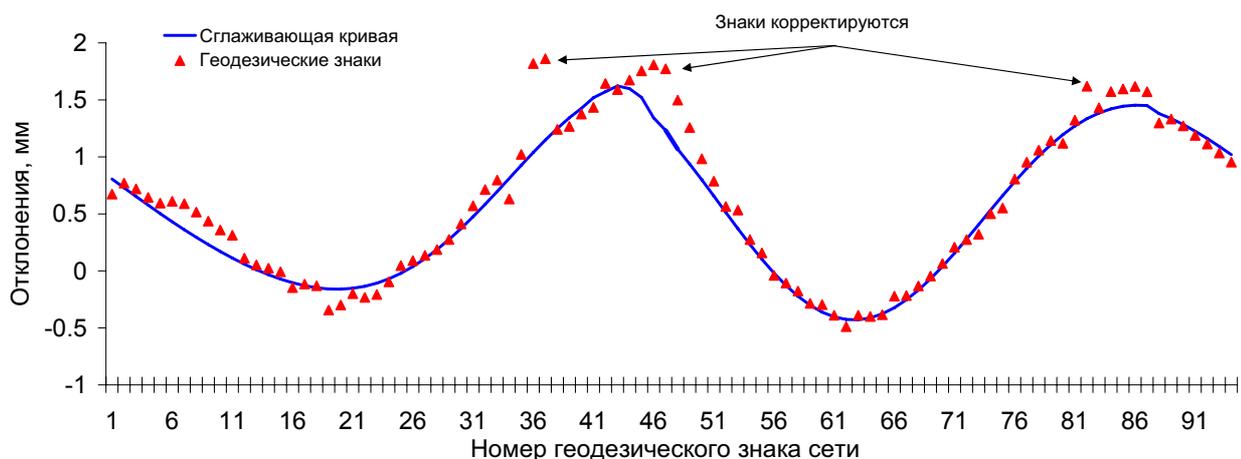


Рис. 7.15: Положение геознаков по горизонтали, съемка 2003 года.

Юстировка элементов магнитной системы производится раз в год, перед этим производится исполнительная съемка положения знаков геодезической сети комплекса. Ведется ежегодное наблюдение геодезической сети тоннеля ВЭПП-4М на устойчивость. Измерения положения магнитов показывают, что не происходит их смещений

относительно несущих конструкций тоннеля. Поэтому всем деформациям тоннеля соответствуют и деформации магнитной системы.

По высоте магниты юстируются с учетом фактического высотного положения геознаков без сглаживающей кривой, элементы выставляются в единую горизонтальную плоскость. Это объясняется тем, во-первых, что высотные измерения и юстировка менее трудоемки и, во-вторых, что к этой плоскости привязаны другие установки (ВЭПП-3, каналы и станции СИ и др.).

На рис. 7.16 представлены осадки тоннеля ВЭПП-4М за последние 10 лет. Видно, что на промежутке с 45-го по 80-й геознаки происходит регулярная осадка тоннеля, которая за 25 лет составила 12 мм.

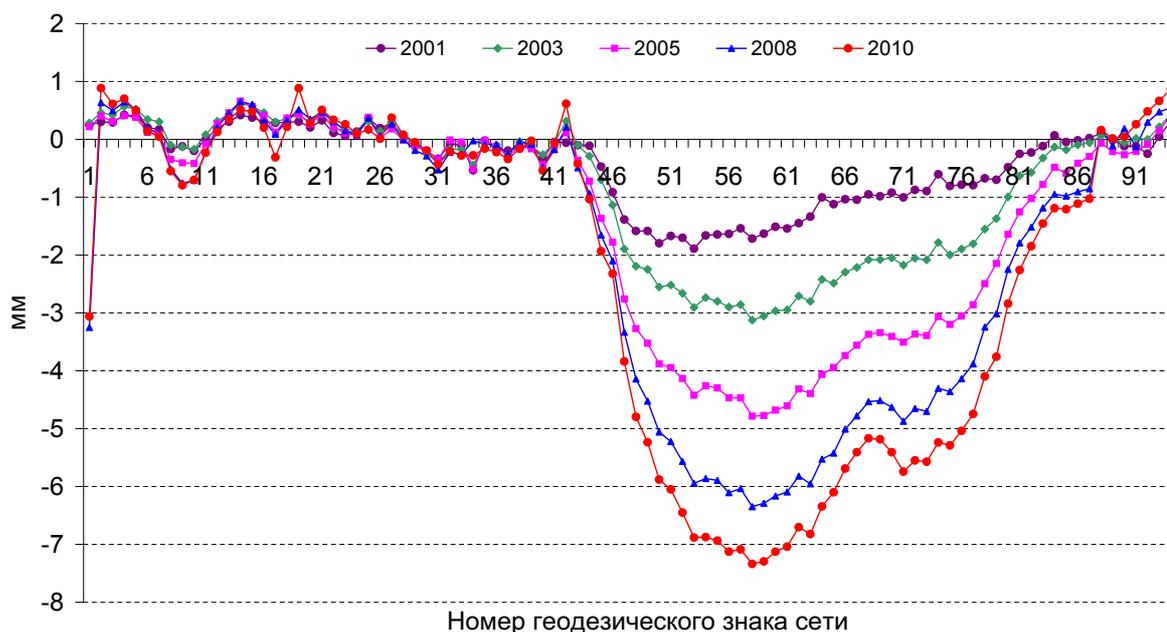


Рис. 7.16: Осадки тоннеля ВЭПП-4М за 2001 – 2010 гг.

В настоящее время на комплексе ВЭПП-4М происходит перевод геодезических измерений на новую инструментальную и методическую базу, основанную на использовании API Laser Tracker3 [94]. Производится модернизация сети, на внутренней стороне тоннеля закреплено 50 магнитных марок для позиционирования отражателя трекера. Предполагается, что время геодезических работ будет значительно уменьшено без потери точности.

7.8 Системы обратной связи

Продольная обратная связь

Для экспериментов по физике высоких энергий на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М реализован режим работы с двумя электронными и двумя позитронными сгустками, позволяющий значительно увеличить светимость. Побочным эффектом увеличения количества сгустков является возникновение неустойчивости продольного движения пучков, приводящей к фазовым колебаниям с большой амплитудой. Фазовые колебания являются причиной резкого снижения светимости и времени жизни пучка. Более того, попадание частиц пучка на дрейфовую камеру детектора КЕДР может спровоцировать пробой высокого напряжения и повредить дрейфовую камеру.

Причиной неустойчивости является резонансное возбуждение пучком паразитных высших мод ускоряющих ВЧ резонаторов ВЭПП-4М. Взаимодействие пучка с высшими модами резонаторов (узкополосный импеданс) приводит к возбуждению долгоживущих wake-полей, которые, воздействуя на следующие сгустки, могут вызвать продольную неустойчивость в многосгустковом режиме. Для отстройки высших мод в каждом из пяти резонаторов ВЭПП-4М предусмотрено по три управляемых механизма, с помощью которых можно настроить области устойчивого движения пучка. Однако, под воздействием внешних факторов происходит изменение размеров резонатора, выводящее его из области устойчивого движения пучка.

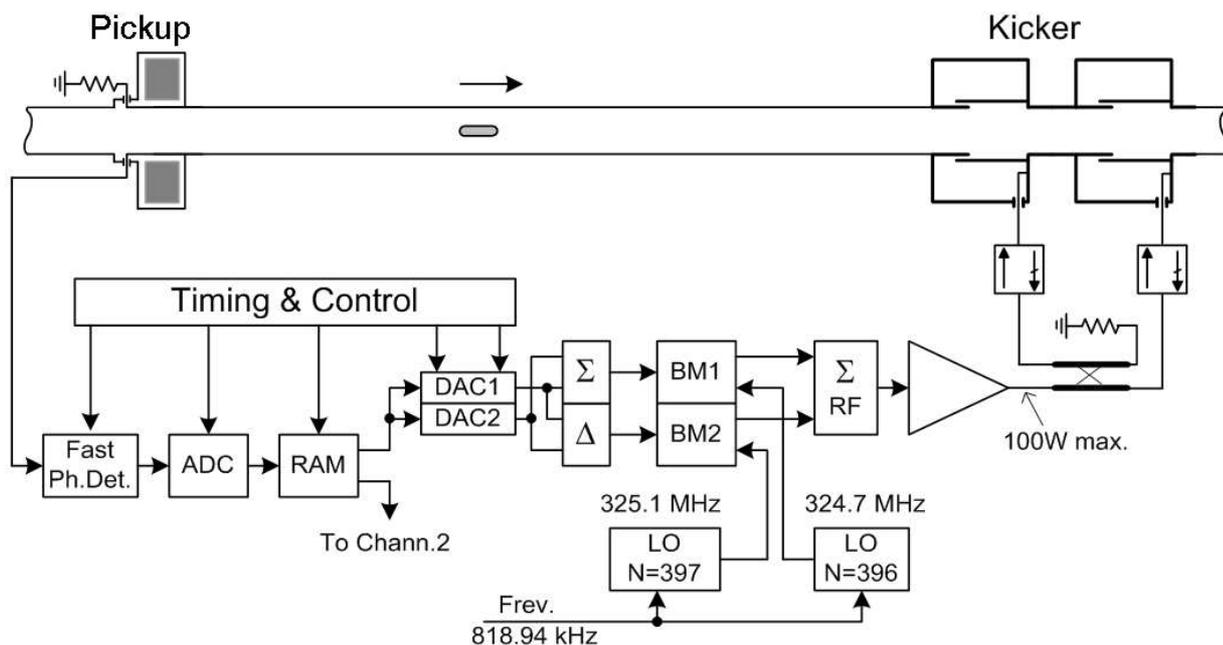


Рис. 7.17: Система продольной обратной связи ВЭПП-4М.

Для надежного подавления продольной неустойчивости пучка на ВЭПП-4М разработана система обратной связи (ОС) [95]. Блок-схема системы приведена на рис. 7.17, показан только один канал для одного типа частиц (электронов или позитронов). Поскольку в накопителе циркулируют две пары сгустков e^+ и e^- , система ОС должна подавлять четыре связанных моды колебаний — две для электронов и две для позитронов. Сигналы, пропорциональные продольной фазе каждого сгустка, получают на каждом обороте пучка с помощью быстрого фазового детектора, подключенного к датчику пучка. Для регистрации сигналов используется схема выборки-хранения, выходные сигналы которой оцифровываются быстрым АЦП и записываются в оперативную память. Цифровая информация считывается из памяти и преобразуется 4-мя цифроаналоговыми преобразователями в 4 аналоговых сигнала, каждый из которых пропорционален мгновенной фазе соответствующего сгустка ($2 e^+$ и $2 e^-$). Суммарный сигнал каждой пары соответствует синфазной моде колебаний, разностный сигнал — противофазной. Эти сигналы используются для модуляции ВЧ напряжения, подаваемого на кикер, с помощью двух балансных модуляторов. В схему встроены два генератора несущей частоты, один настроен на четную 398-ю гармонику частоты обращения для подавления синфазной моды, второй — на нечетную 397-ю гармонику для подавления противофазной моды. Выходные сигналы балансных модуляторов суммируются и подаются на усилитель мощности.

Два высокочастотных кикера используются в системе, один — для электронов, другой — для позитронов. Каждый кикер состоит из пары резонаторов, собственная частота которых $f_c = 325.5$ МГц находится посередине между 397-й и 398-й гармониками частоты обращения. Расстояние между резонаторами каждой пары выбрано равным четверти длины волны — 230 мм. Частоты высших мод резонаторов кикера находятся выше критической частоты вакуумной камеры (2500 МГц), что минимизирует возможные проблемы с wake-полями. Выходная мощность ВЧ усилителя разделяется с помощью направленного ответвителя и подается на резонаторы через кабели равной длины. Резонаторы соединены так, что для частиц определенной полярности (e^+ или e^-), движущихся в своем направлении, фаза ВЧ напряжения во втором резонаторе сдвинута на $\pi/2$ относительно фазы в первом резонаторе. Таким образом, частицы данной полярности получают двойной удар, в то время как на частицы, движущиеся в противоположном направлении, кикер практически не оказывает воздействия. Схематический чертеж резонатора показан на рис. 7.18а, внешний вид ВЧ кикера, установленного на ВЭПП-4М — на рис. 7.18б.

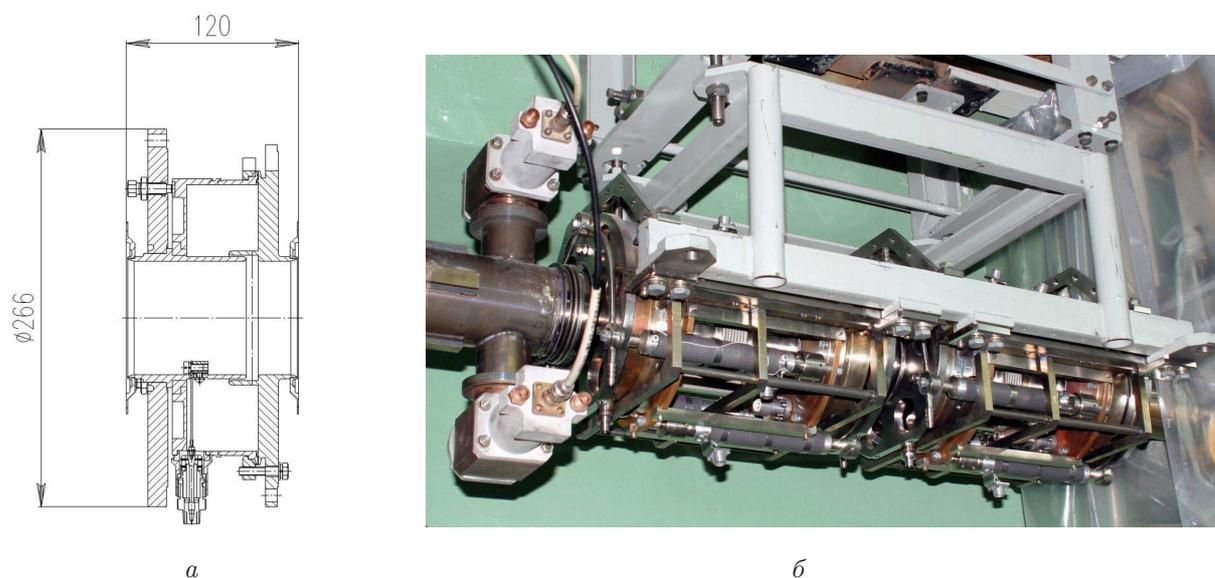


Рис. 7.18: ВЧ кикер: эскиз резонатора (а) и внешний вид (б).

Декремент, вносимый системой обратной связи, измерялся с помощью возбуждения вынужденных колебаний пучка, включая сигнал внешнего низкочастотного генератора в петлю ОС. Практические испытания системы обратной связи были проведены с реальной многосгустковой неустойчивостью, в настоящее время система введена в регулярную эксплуатацию [30].

Поперечная обратная связь

Предельный ток пучка в электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М на энергии инжекции, равной 1.8 ГэВ, ограничен неустойчивостью вертикальных бетатронных колебаний, обусловленной связью поперечных мод (transverse mode coupling или fast head-tail) [96]. ТМС-неустойчивость возникает вследствие электромагнитного взаимодействия пучка с окружающей структурой и характеризуется значительным когерентным сдвигом бетатронной частоты, пропорциональным току пучка.

Практически сразу после обнаружения head-tail неустойчивости были начаты разработки систем обратной связи для ее подавления. Для борьбы с многосгустковыми

неустойчивостями на многих установках успешно используется резистивная схема обратной связи, которая вносит затухание в колебательное движение каждого сгустка как целого. В случае же внутрисгустковой неустойчивости резистивная ОС с самого начала представлялась неадекватной, поскольку движение частиц в сгустке сложно, и трудно надеяться, что удастся внести затухание всех мод, воздействуя на центр масс сгустка. Поэтому была предложена реактивная схема ОС, которая препятствовала бы изменению частоты нулевой моды (колебания сгустка как целого), и таким образом уменьшала бы связь head-tail-мод, приводящую к ТМС-неустойчивости [97]. Согласно теории, разработанной с использованием как двухчастичной модели [98], так и модели сплошной среды (уравнение Власова) [99], реактивная обратная связь может повысить пороговый ток неустойчивости в 2–4 раза, в то время как резистивная обратная связь абсолютно непригодна для подавления ТМС-неустойчивости. При этом расчеты показали, что в случае реактивной ОС предъявляются очень жесткие требования к фазе обратной связи. Вариант реактивной схемы ОС, предложенной в работе [100], был реализован на коллайдере LEP в ЦЕРНе (Швейцария). Было достигнуто некоторое увеличение порогового тока пучка — около 5 % [101].

Для электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М была разработана система обратной связи с регулируемой фазой [102], позволяющая реализовать как реактивную, так и резистивную схемы. В качестве датчика, регистрирующего колебания пучка, и кикера, воздействующего на пучок, используются согласованные полосковые линии. Свойство направленности полосковых линий позволяет разделить сигналы, наведенные электронным и позитронным пучками на датчик, а также обеспечивает раздельное воздействие кикера на электроны и позитроны. Обработка сигнала осуществляется селективной схемой с преобразованием частоты. Предварительная обработка сигналов производится на частоте $(222 \pm \nu_\beta)f_0$, близкой к максимуму чувствительности полоскового датчика, а формирование сигнала кикера — на более низкой частоте $\nu_\beta f_0$ (ν_β — дробная часть бетатронной частоты, f_0 — частота обращения пучка). Низкочастотная часть системы ОС включает в себя фильтр нижних частот с полосой пропускания $0-0.5f_0$, предусилитель, фазовращатель, аттенюатор и усилитель мощности. Диапазон регулирования фазы $0-2\pi$ обеспечивает возможность реализации как активной, так и реактивной обратной связи.

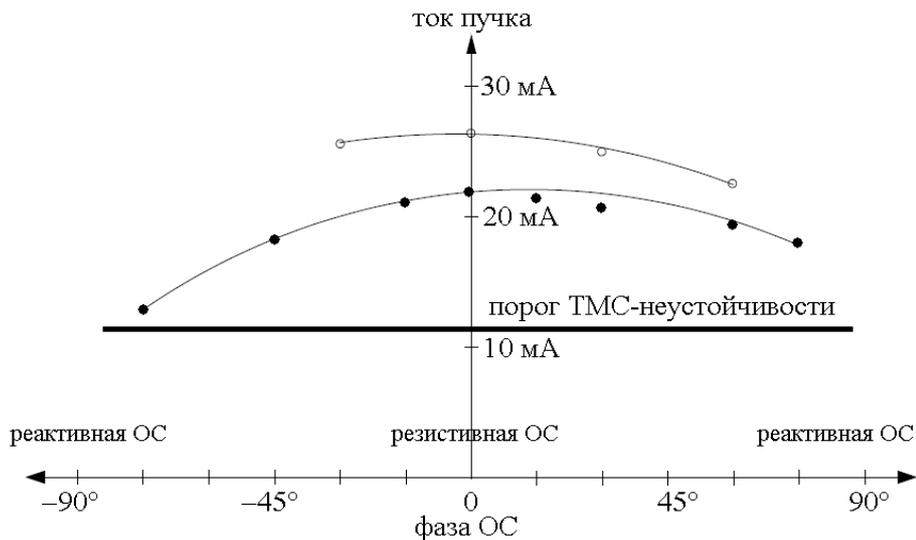


Рис. 7.19: Ток захваченного пучка ВЭПП-4М в зависимости от фазы обратной связи.

Было исследовано влияние ОС на эффективность инжекции пучка в накопитель ВЭПП-4М при небольшом положительном хроматизме. Неожиданно оказалось, что в противоречие теории [98, 99] резистивная обратная связь также повышает порог неустойчивости, причем более эффективно. На рис. 7.19 показана зависимость тока, захваченного в ВЭПП-4М, от фазы ОС. Как видно, оптимальная фаза обратной связи оказалась ближе к нулю (резистивная ОС), чем к 90° (реактивная ОС), при этом был достигнут ток пучка, более чем вдвое превышающий порог ТМС-неустойчивости [102].

Математическая модель head-tail неустойчивости с учетом хроматизма магнитной структуры, разработанная на основе многомодового анализа задачи на собственные значения, опубликована в работе [103]. С использованием данной модели были подробно исследованы условия применимости реактивной, резистивной либо некоторой промежуточной схемы обратной связи для подавления ТМС-неустойчивости. Согласно [103], резистивная ОС должна эффективно подавлять неустойчивость при большом отрицательном хроматизме. Основная идея заключается в подавлении когерентной моды колебаний (центр масс пучка) с помощью обратной связи, в то время как стабильность высших мод обеспечивается отрицательным хроматизмом. Численное решение задачи на собственные значения для 10 низших мод показывает, что при хроматизме $\xi = -8$ резистивная ОС должна обеспечивать устойчивость пучка, ток которого превышает порог ТМС-неустойчивости примерно до 4 раз.

На основе теории [103] спроектирована и изготовлена система обратной связи для подавления поперечной неустойчивости пучка в электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М [104]. Для обеспечения большей гибкости системы и возможного расширения ее функций была выбрана цифровая схема ОС [105]. Блок-схема системы изображена на рис. 7.20.

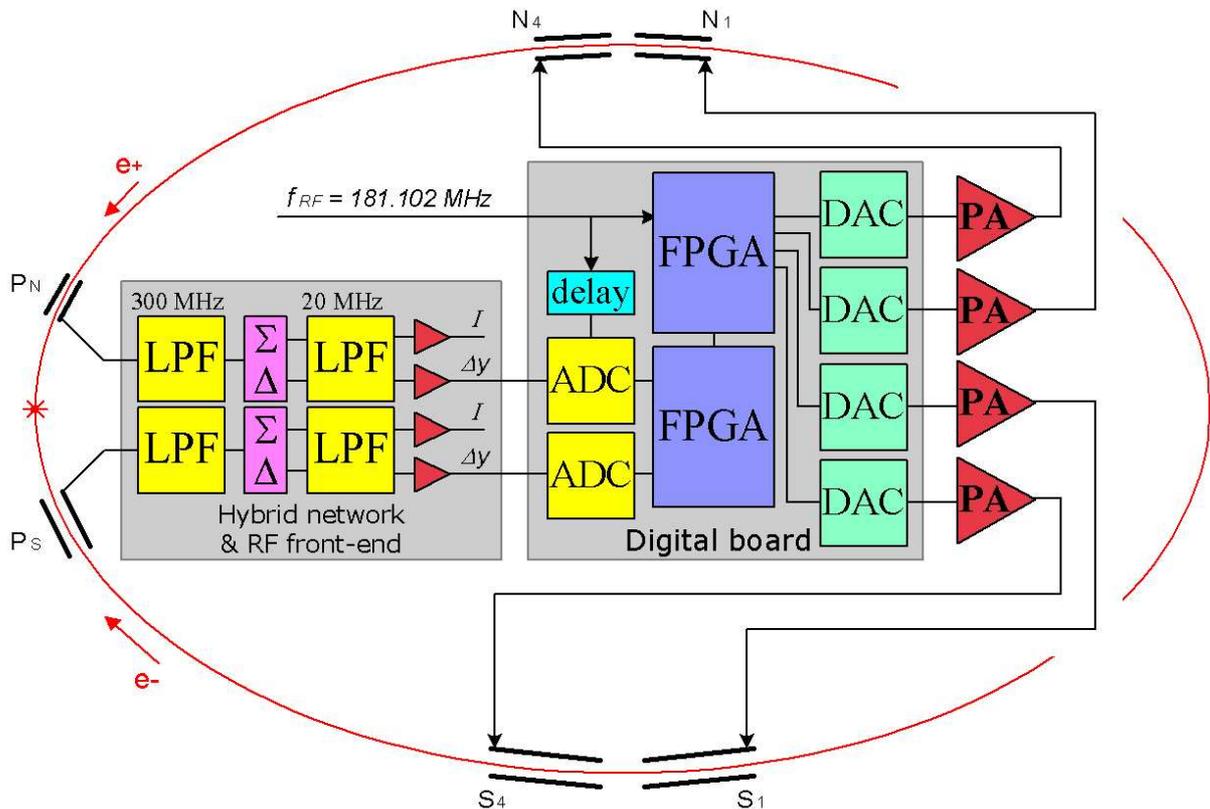


Рис. 7.20: Система поперечной обратной связи ВЭПП-4М.

В качестве датчиков положения пучка используются два полосковых пикапа P_S и P_N , сигналы которых поступают в пикап-станцию, включающую НЧ фильтры (LPF) и суммо-разностные схемы (Σ/Δ), формирующие сигналы, пропорциональные интенсивности и поперечному смещению пучка. Сформированные на выходе пикап-станции аналоговые сигналы подаются на вход цифрового блока. Цифровой блок включает два 12-разрядных 210-МГц конвейерных АЦП (ADC), используемых для пооборотной оцифровки сигналов вертикального положения электронных и позитронных сгустков. Выбор заданного сгустка производится с помощью управляемой задержки (delay) сигнала, тактирующего АЦП. Две программируемых логических интегральных схемы (FPGA) производят расчет величины корректирующего удара и формируют сигналы коррекции. Для подавления постоянной составляющей сигналов положения пучка и расчета амплитуды и фазы корректирующего импульса в FPGA реализованы 2-звенные FIR-фильтры. Рассчитанные корректирующие импульсы конвертируются в аналоговые сигналы с помощью четырех ЦАП (DAC) на выходе цифрового блока и поступают на широкополосные усилители мощности (PA) [106]. Полоса частот усилителя составляет 0.5–50 МГц, максимальная выходная мощность — 200 Вт. Усиленные сигналы подаются на 4 полосковых кикера (N_1, N_4, S_1, S_4), импульсное электромагнитное поле которых производит требуемую коррекцию движения сгустка. Управление системой и передача данных осуществляется посредством протокола Ethernet, для чего в составе цифрового блока предусмотрены трансиверы, а в FPGA реализован стек UDP/IP. Программа управления системой с графическим интерфейсом работает в операционной системе Linux.

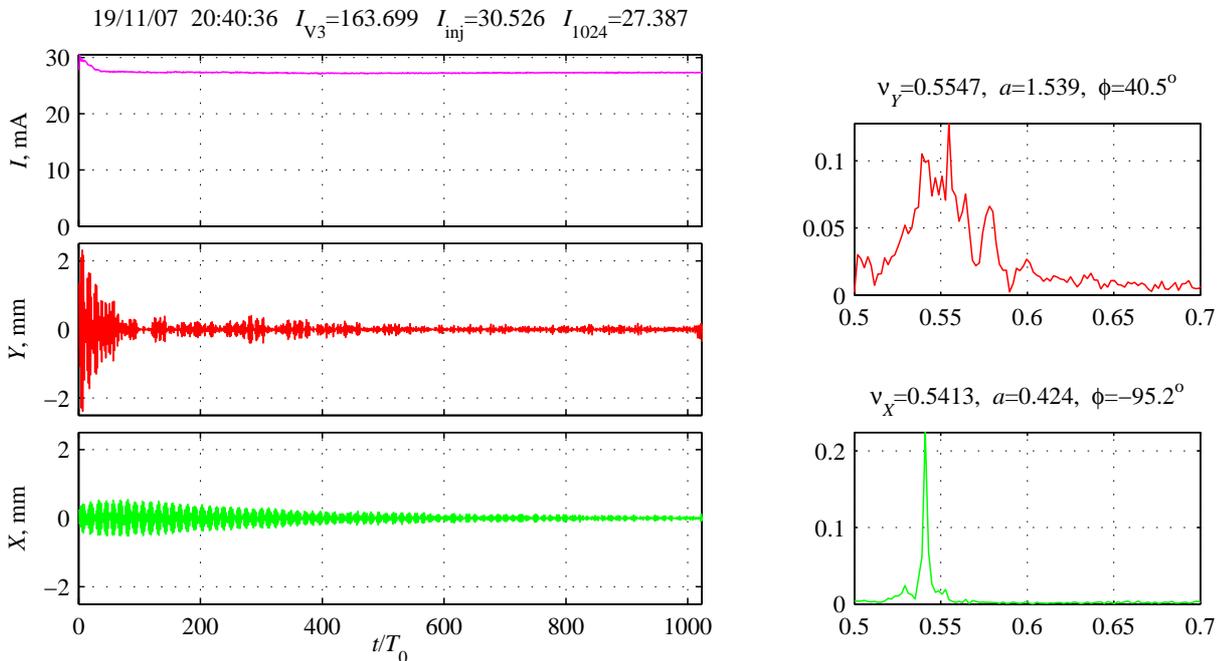


Рис. 7.21: Инжекция пучка с замкнутой петлей ОС; ток пучка более чем втрое превышает порог ТМС-неустойчивости; $\xi_y = 4$, $\xi_x = 2$.

Проведены исследования эффективности системы поперечной ОС ВЭПП-4М в режимах с различными значениями вертикального хроматизма. Эксперименты показали, что, вопреки теории [103], обратная связь более эффективна при положительном хроматизме, чем при отрицательном. При отрицательном хроматизме, несмотря

на большое относительное приращение тока по сравнению с выключенной ОС, абсолютный максимальный ток все же меньше, чем при положительном. Возможной причиной большей эффективности ОС при положительном хроматизме может быть периодический (с синхротронной частотой) обмен энергией между связанными head-tail модами, наблюдаемый датчиком положения пучка как модуляция когерентных колебаний. Такое взаимодействие когерентной и некогерентных мод может объяснять эффективность обратной связи при положительном хроматизме: несмотря на то, что некогерентные моды неустойчивы, происходит периодическая перекачка энергии колебаний в когерентную моду, которая подавляется обратной связью.

На рис. 7.21 показаны поворотные графики тока (левый верхний), вертикальной (левый средний) и горизонтальной (левый нижний) координаты инжектированного пучка, измеренные пикапом в течение 1024 оборотов, на рисунке также указаны выпускаемый ток ВЭПП-3 I_{V3} , начальный ток I_{inj} и ток через 1024 оборота I_{1024} . На правом верхнем графике изображен спектр вертикальных колебаний пучка, на правом нижнем — горизонтальных. Видно, что система обратной связи подавляет вертикальные колебания менее, чем за 100 оборотов, при этом потери тока невелики.

Отлажена работа системы поперечной обратной связи для 2-х позитронных и 2-х электронных пучков. В стандартном режиме ВЭПП-4М на энергии инжекции 1850 МэВ с вертикальным хроматизмом $\xi_y = 4$ достигнуто более чем трехкратное превышение порогового тока ТМС-неустойчивости (инжектирован пучок с током 27 мА в одном сгустке), причем ограничение тока пучка определялось бустерным накопителем ВЭПП-3, а не системой обратной связи. В двух сгустках с помощью системы ОС удалось инжектировать в ВЭПП-4М и ускорить до энергии 4 ГэВ 40 мА электронов.

8 Измерение энергии пучка

8.1 Метод резонансной деполяризации

Метод резонансной деполяризации (РД), являющийся наиболее точным для абсолютной калибровки энергии в электрон-позитронном накопителе, был впервые предложен и реализован в ИЯФ СО РАН [107]. В его основе лежит измерение частоты прецессии спина Ω . В накопителе с плоской орбитой (когда на равновесной орбите отсутствуют радиальные и продольные магнитные поля, а электрическое поле представлено исключительно продольным полем в ускоряющих резонаторах) средняя частота прецессии спина вокруг направления ведущего магнитного поля дается выражением

$$\Omega = \omega_0 \left(1 + \gamma \frac{q'}{q_0} \right), \quad (8.8)$$

где ω_0 — угловая частота обращения, q'/q_0 — отношение аномальной части гиромагнитного отношения электрона к нормальной, γ — релятивистский фактор.

Деполяризация происходит при введении внешнего электромагнитного поля с частотой Ω_d , удовлетворяющей условию внешнего спинового резонанса

$$\Omega \pm \Omega_d = n\omega_0 \quad (8.9)$$

при любом целом n . Факт деполяризации может быть зарегистрирован любым поляризационно-чувствительным процессом. Вводя нормализованную спиновую частоту

$$\nu = \frac{\Omega}{\omega_0} - 1 = \gamma \frac{q'}{q_0}, \quad (8.10)$$

получаем простое выражение для энергии пучка E :

$$E = \nu \frac{mc^2}{q'/q_0} = \nu \cdot 440.64843(3) \text{ МэВ}. \quad (8.11)$$

Входящие в это выражение константы известны с высокой точностью:

$$mc^2 = 0.51099892 \pm 4 \cdot 10^{-8} \text{ МэВ}, \quad q'/q_0 = 1.1596521859 \cdot 10^{-3} \pm 3.8 \cdot 10^{-12},$$

что дает принципиальную возможность найти энергию частицы по измеренной частоте спиновой прецессии с предельной относительной точностью $7.8 \cdot 10^{-8}$. Важно отметить, что требуется точно измерять не абсолютное значение частоты прецессии, а только ее отношение к частоте обращения.

Поляризованные электрон-позитронные пучки на комплексе ВЭПП-4 получают благодаря известному действию магнитодипольного излучения. При движении частицы ее магнитный момент прецессирует вокруг направления вектора магнитного поля и составляющая магнитного момента, ортогональная полю, уменьшается за счет магнитодипольного излучения. В результате за характерное время излучения спин ориентируется вдоль магнитного поля (эффект Соколова-Тернова) [108]. Характерное время радиационной поляризации τ_{pol} в произвольном накопителе находится из уравнения

$$\frac{1}{\tau_{\text{pol}}} = \frac{5\sqrt{3}}{8} \frac{r_e \Lambda_c c \gamma^5}{R^3} \langle |K^3| \rangle, \quad (8.12)$$

где $\Lambda_c = 3.86 \cdot 10^{-11}$ см — комптоновская длина волны, $r_e = 2.82 \cdot 10^{-13}$ см — классический радиус электрона, c — скорость света, γ — релятивистский фактор, K — кривизна орбиты в единицах обратного среднего радиуса R^{-1} , $\langle \dots \rangle$ — усреднение по азимуту. Удобно пользоваться формулами для τ_{pol} применительно к комплексу ВЭПП-4:

$$\text{ВЭПП-3:} \quad \tau_{\text{pol}}[\text{час}] = \frac{12}{(E[\text{ГэВ}])^5} \approx 33 \text{ мин при } E = 1.85 \text{ ГэВ},$$

$$\text{ВЭПП-4М:} \quad \tau_{\text{pol}}[\text{час}] = \frac{1540}{(E[\text{ГэВ}])^5} \approx 70 \text{ час при } E = 1.85 \text{ ГэВ}.$$

В кольце коллайдера ВЭПП-4М на энергии 1.8 ГэВ время поляризации неприемлемо велико. Однако наличие бустерного накопителя ВЭПП-3 с существенно меньшим средним радиусом орбиты и временем поляризации порядка одного часа позволяет получать поляризованные пучки, перепускаемые и используемые затем в ВЭПП-4М.

Обзор методов наблюдения поляризации, использовавшихся в накопителях ИЯФ, приведен в [109]. В нашем случае на ВЭПП-4М в области энергий до 2 ГэВ для регистрации факта деполяризации пучка используется эффект внутрисгусткового рассеяния частиц (эффект Тушека). Скорость счета рассеянных частиц, зависящая от спина, измеряется тремя парами сцинтилляционных счетчиков, вводящихся в апертуру по горизонтали [110]. В акте рассеяния два электрона получают одинаковые по величине, но разные по знаку приращения импульса, и в результате начинают двигаться по траекториям, симметрично отклоненным в медианной плоскости от замкнутой орбиты. Это позволяет подавлять некоррелированный фон, применяя схему совпадений регистрируемых событий, однако в нашем случае внутрисгустковое рассеяние доминирует над рассеянием на остаточном газе. Поэтому, во-первых, подавлять некоррелированный фон нет особой необходимости, а во-вторых, для уменьшения статистической ошибки используется суммарная загрузка счетчиков, которая может достигать 2 – 3 МГц при токе пучка 2 мА. В оптимизированном варианте применяются две пары счетчиков с искусственным ограничением скорости счета для повышения ее стабильности уровнем 500 – 700 кГц (150 – 180 кГц на счетчик). При калибровках энергии в экспериментах по измерению масс, как правило, используется одна из этих пар.

В поляризованном сгустке электрическое отталкивание электронов при рассеянии ослабляется их магнитным взаимодействием, что уменьшает интенсивность тушековских частиц в фиксированном интервале конечных импульсов. После резонансной деполяризации происходит относительное увеличение скорости счета рассеянных электронов. На ВЭПП-4М изменение скорости счета составляет в различных случаях 1 – 3%. Для уменьшения влияния нестабильности положения пучка, его размеров и времени жизни измеряется отношение скоростей счета рассеянных электронов от поляризованного W_1 и неполяризованного W_2 сгустков, разделенных во времени на полпериода обращения: $\delta = 1 - W_2/W_1$.

Деполяризация пучка осуществляется с помощью пары согласованных полосковых линий, разнесенных по вертикали внутри вакуумной камеры, в которых создается бегущая ТЕМ волна, распространяющаяся навстречу одному из пучков (e^- или e^+), на который оказывает деполяризирующее действие. Частота волны линейно перестраивается в диапазоне, включающем ожидаемое значение частоты внешнего спинового резонанса. В другом варианте подключения пластин к ВЧ генератору деполяризатор действует одновременно на электроны и позитроны переменным поперечным магнитным полем, создаваемым протекающим по пластинам током (рис. 8.1).

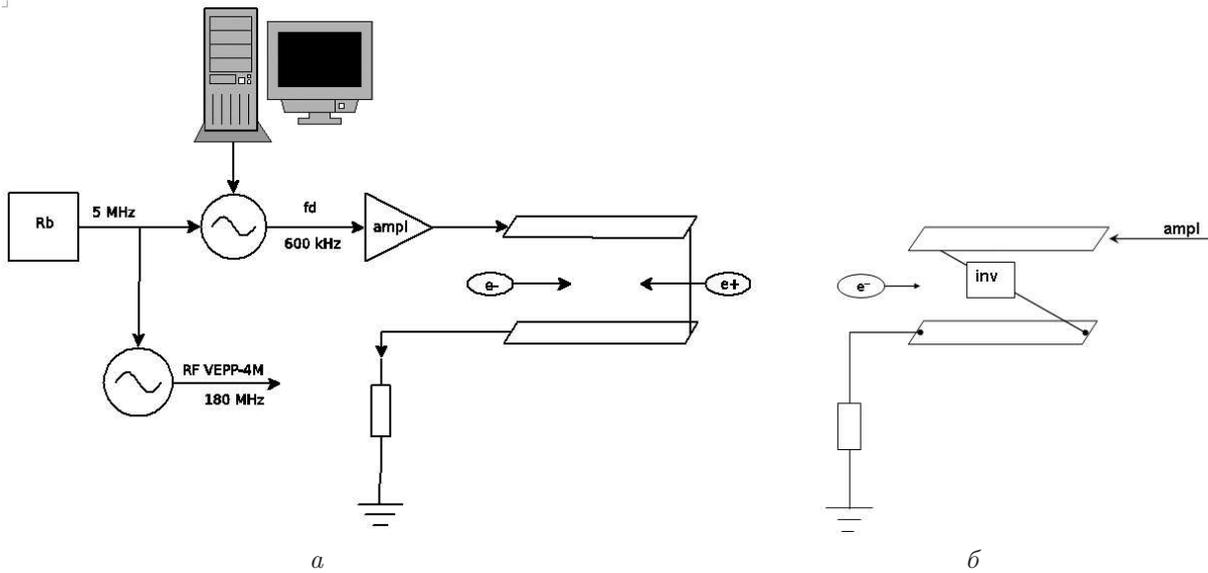


Рис. 8.1: Схема управления деполаризатором при деполаризации обоих (а) и одного (б) сгустков.

Синусоидальный сигнал деполаризатора генерируется разработанным в ИЯФ СО РАН прецизионным синтезатором [111], с которым достигнуто разрешение по шагу перестройки частоты 10^{-4} Гц. Опорным генератором для синтезатора и одновременно для ВЧ системы ВЭПП-4М служит Rb стандарт частоты Ч1-69, имеющий точность 10^{-10} . Это обеспечивает стабильность частоты обращения и связанную с ней стабильность энергии пучка в периоды между РД калибровками

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} \approx 6 \cdot 10^{-9}, \quad (8.13)$$

где $\alpha = 0.017$ — коэффициент уплотнения орбит. Кроме того, в процессе калибровки привязка частот деполаризатора и частоты обращения к единому стандарту исключает разнонаправленный дрейф этих частот и появление соответствующей ошибки в определении энергии.

Поскольку модуляционные резонансы, вызванные низкочастотными пульсациями ведущего поля, могут приводить к ошибке в определении энергии, на ВЭПП-4М приняты меры по подавлению низкочастотных пульсаций поля до уровня 1 – 10 ppm, что дает замедление скорости деполаризации при частоте пульсаций 50 Гц на первом боковом резонансе по сравнению с основным более, чем на порядок [112].

Предельная точность абсолютной калибровки энергии пучка РД обусловлена шириной спиновой линии, которая определяется квадратичной нелинейностью ведущего магнитного поля и для ВЭПП-4М составляет $\varepsilon_\nu/\nu \approx 5 \cdot 10^{-7}$ (ошибка в определении энергии около 1 кэВ) [26, 112]. На рис. 8.2 показана типичная временная диаграмма относительной скорости счета тушековских электронов при сканировании частоты деполаризатора. Скорость сканирования в единицах энергии 0.3 кэВ/сек. Амплитуда сигнала на пластинах — несколько десятков вольт. Расчетное время деполаризации — около 1 сек. Точность определения энергии составляет около 10^{-6} . Двухзаходное сканирование (вверх и вниз по частоте) на одном и том же поляризованном пучке с частичной деполаризацией в первом заходе позволяет оценить ширину полосы деполаризации по разности найденных спиновых частот (энергий). Эта разность переменна по знаку и величине и связана с временной нестабильностью источника питания

основного поля накопителя. Разброс ее значений в проводимых калибровках — порядка 10^{-6} , что согласуется с данными «быстрых» измерений поля в калибровочном магните ЯМР магнитометром [25].

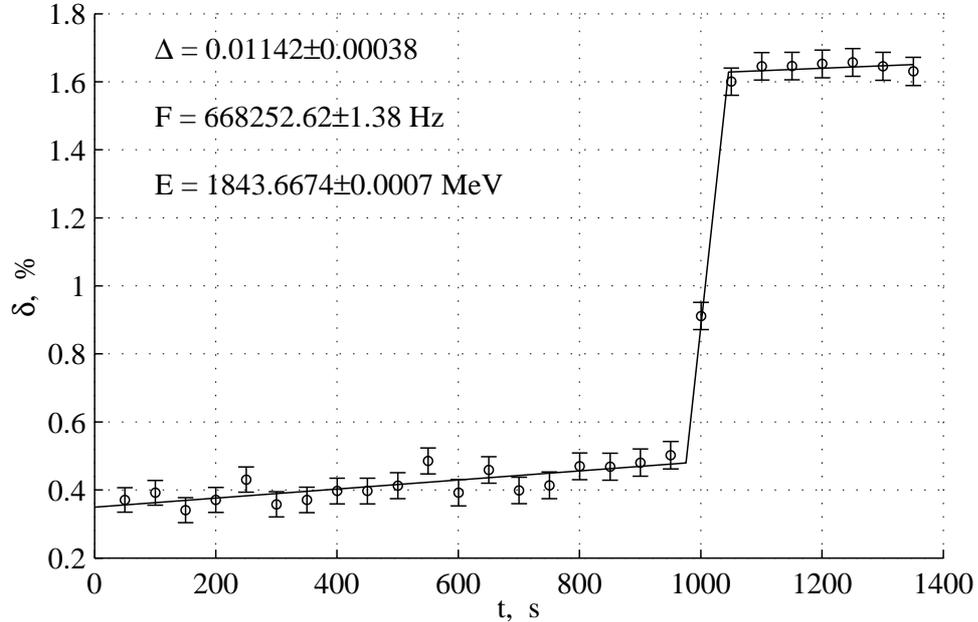


Рис. 8.2: Деполяризационный скачок в скорости счета тушековских электронов при сканировании частоты деполяризатора. Измеренное значение энергии приведено с указанием ошибки фитирования (0.7 кэВ).

Для прецизионного измерения масс частиц важна величина систематической ошибки при использовании метода резонансной деполяризации. Различные источники таких ошибок подробно изучались на ВЭПП-4М [113, 114]. К основным из них можно отнести:

- нарушение закона пропорциональности между спиновой частотой и энергией (неплоская или с кручением орбита) [115, 116];
- зависимость средневзвешенной частоты спиновой прецессии частиц в сгустке от его тока;
- влияние малых возмущений орбиты (например, при разведении орбит в паразитных местах встречи);
- долговременная стабильность энергии между последовательными калибровками (температурная составляющая, стабильность частоты ВЧ, стабильность магнитных элементов) [117].

Кроме того, для уточнения ошибки в определении энергии в системе центра масс по данным калибровок энергии только одного из пучков (электронного), которая входит в окончательный результат измерения масс частиц детектором КЕДР, рассмотрено:

- соответствие локальной энергии в месте встречи средней энергии по кольцу, измеряемой РД (асимметрия потерь на излучение, продольное ускорение частиц в поле встречного сгустка);
- соответствие средневзвешенной по светимости энергии встречных пучков энергии, найденной по методу РД (хроматизм бета-функции, влияние разведения в паразитных местах встречи на вертикальную дисперсию в основном месте встречи) [118];

- соответствие энергии рождающихся частиц кинетической энергии, определяемой по частоте прецессии спина (потенциал в пучке) [119].

Начаты эксперименты по одновременной деполаризации и измерению энергий методом РД электронного и позитронного пучков. По предварительным данным, измеренная разница энергий электронов и позитронов составляет около 1 кэВ и связана, в основном, с разведением орбит в местах встречи.

8.2 Метод обратного комптоновского рассеяния

Обратное комптоновское рассеяние лазерных фотонов применялось для измерения энергии электронных пучков на источниках синхротронного излучения [120, 121]. На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М метод был реализован в 2005 году, впервые для установок на встречных пучках, и с тех пор является рутинным инструментом для мониторинга энергии пучка [29].

Метод основан на том, что максимальная энергия рассеянного фотона однозначно связана с энергиями электрона и фотона до рассеяния:

$$\omega = \omega_0 \frac{1 - \beta \cos \alpha}{1 - \beta \cos \theta + \frac{\omega_0}{E} (1 - \cos \Theta)}, \quad (8.14)$$

где ω и ω_0 — энергии фотона до и после рассеяния, соответственно; E и $\beta = v/c$ — энергия и Лоренц-фактор электрона до рассеяния; α — угол между фотоном и электроном до рассеяния; θ — угол между импульсами начального электрона и рассеянного фотона; Θ — угол между импульсами начального и рассеянного фотонов (см. рис. 8.3).

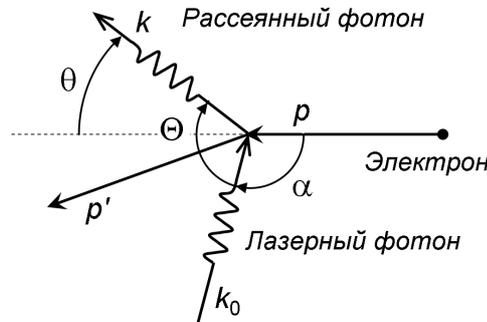


Рис. 8.3: Кинематика комптоновского рассеяния.

Максимальная энергия рассеянного фотона ω_{\max} соответствует направлению начального импульса электрона ($\theta = 0$, $\Theta = \alpha$):

$$\omega_{\max} = \omega_0 \frac{1 - \beta \cos \alpha}{1 - \beta + \frac{\omega_0}{E} (1 - \cos \alpha)}. \quad (8.15)$$

В случае $\alpha = \pi$ (лобовое столкновение) энергия рассеянного фотона ω_{\max} достигает максимально возможного значения:

$$\omega_{\max} = \frac{E^2}{E + \frac{m^2}{4\omega_0}}. \quad (8.16)$$

Энергетический спектр рассеянных фотонов показан на рис. 8.4. Сплошной линией показана зависимость сечения рассеяния от энергии фотона, кругами — зависимость угла рассеяния фотона θ в единицах θ_c ($\theta_c \sim 1/\gamma \equiv m/\varepsilon$) от энергии фотона. Для обоих графиков энергия начального фотона $\omega_0 = 0.12$ эВ, энергия электрона $E = 1777$ МэВ, угол взаимодействия $\alpha = \pi$.

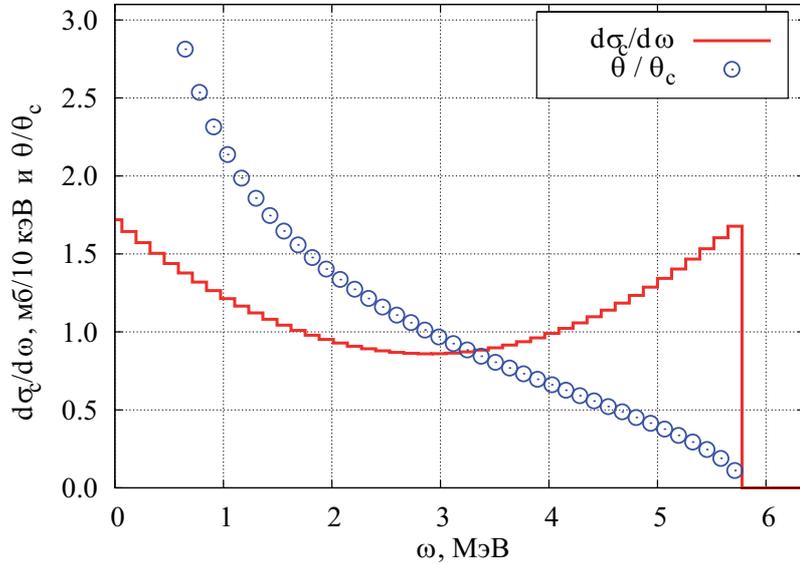


Рис. 8.4: Энергетический спектр рассеянных фотонов (линия) и зависимость угла рассеяния от энергии фотона (круги).

Из рис. 8.4 видно, что фотоны с максимальной энергией ω_{\max} рассеиваются вдоль импульса начального электрона и образуют резкий край в энергетическом спектре: измеряя спектр, можно определить ω_{\max} . Очевидно, что для этого энергия начальных фотонов ω_0 должна быть постоянной и хорошо известной. Источником таких фотонов может быть лазер с достаточно узким спектром излучения. На практике имеет смысл рассматривать взаимодействие лазерного пучка с электронным пучком, подразумевая что величины E и ω_0 описывают средние значения энергий взаимодействующих электронов и фотонов. Таким образом, измеряя среднее значение ω_{\max} , можно определить среднюю энергию электронов в пучке:

$$E = \frac{\omega_{\max}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0 \omega_{\max}}} \right) \simeq \frac{m}{2} \sqrt{\frac{\omega_{\max}}{\omega_0}}. \quad (8.17)$$

В качестве источника монохроматических фотонов на ВЭПП-4М используется CO₂ лазер COHERENT GEM Select 50. Генерация излучения происходит на переходе 10P20 с энергией фотонов $\omega_0 = 0.117065223$ эВ ($\lambda_0 = 10.591$ мкм). Такая длина волны была выбрана, чтобы максимум энергии комптоновских γ -квантов находился в области 4 – 7 МэВ, что соответствует диапазону измеряемой энергии пучка 0.5 – 2 ГэВ. Ширина спектра лазерного излучения не превышает $\sigma_{\omega_0}/\omega_0 < 3.5 \cdot 10^{-6}$, среднюю энергию фотонов лазерного пучка можно считать постоянной с точностью $\Delta\omega_0/\omega_0 \leq 10^{-8}$. Мощность непрерывного излучения лазера составляет около 50 Вт (ТЕМ₀₀). Излучение лазера с помощью системы линз и зеркал фокусируется и вводится через окно (ZnSe) в вакуумную камеру накопителя, где взаимодействует с электронным пучком под нулевым углом.

Для измерения спектра комптоновских γ -квантов используется детектор из особо чистого германия (HPGe). По сути HPGe детектор является большим германиевым диодом p - n или p - i - n типа, работающим в режиме с обратным смещением. При рабочей температуре (около 90 К) проводимость особо чистого германия достаточно мала, что позволяет использовать детектор при больших запирающих напряжениях (1.5–3.5 кВ) и обеспечить высокую эффективность сбора заряда, освобожденного ионизирующим излучением в объеме детектора. Средняя энергия, необходимая для создания одной электрон-дырочной пары в германии равна 2.95 эВ (при $T = 90$ К), что определяет его превосходные спектрометрические качества. На ВЭПП-4М используется HPGe детектор коаксиального типа с активным объемом около 120 см³ и эффективностью полного поглощения около 5 % для фотонов с энергиями 5–6 МэВ.

Для абсолютной калибровки системы используются радиоактивные изотопы — источники γ -излучения ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ²⁴Na, ²²⁸Ac, размещенные вблизи детектора. Изотопы излучают γ -кванты, энергия которых известна с высокой точностью. Средняя скорость счета γ -квантов, излучаемых калибровочными изотопами — около 1 кГц. Скорость счета комптоновских γ -квантов зависит от интенсивности электронного пучка ВЭПП-4М и в среднем составляет 10 кГц. Для измерения энергии пучка с требуемой точностью необходима регистрация около 5 млн событий, на это требуется от 5 до 30 мин в зависимости от интенсивности потока γ -квантов. На рис. 8.5 приведен пример комптоновского спектра, измеренного на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. Энергетическая шкала и разрешение детектора контролируется по положению и ширине калибровочных пиков.

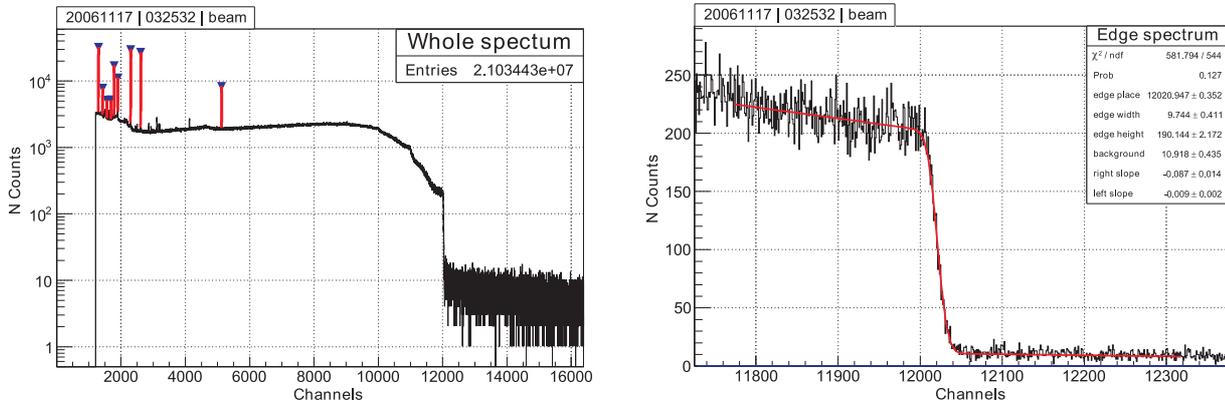


Рис. 8.5: Спектр комптоновских γ -квантов (слева) и его край в увеличенном масштабе.

Край комптоновского спектра аппроксимируется функцией с шестью параметрами:

$$g(x, p_{0,1,\dots,5}) = \frac{1}{2} [p_4 (x - p_0) + p_2] \operatorname{erfc} \left(\frac{x - p_0}{\sqrt{2} p_1} \right) - \frac{p_1 p_4}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - p_0)^2}{2p_1^2} \right] + p_5 (x - p_0) + p_3, \quad (8.18)$$

где p_0 — положение края, соответствующее средней энергии пучка; p_1 — ширина края, пропорциональная энергетическому разбросу; p_2 — высота ступеньки; p_3 — подложка; p_4 — наклон слева; p_5 — наклон справа.

Видимая ширина края спектра обусловлена наличием энергетического разброса в электронном пучке и энергетическим разрешением HPGe детектора, вклад которо-

го вычисляется по калибровочной кривой. Таким образом, одновременно со средней энергией электронов в пучке измеряется и энергетический разброс частиц.

Видимая ширина края спектра (рис. 8.5, справа) обусловлена наличием энергетического разброса в электронном пучке и энергетическим разрешением HPGe детектора. Вклад последнего измеряется по калибровочной кривой, представленной на рис. 8.6. Таким образом, одновременно со средней энергией электронов в пучке измеряется и энергетический разброс частиц. При обработке спектра монохроматические линии калибровочных источников γ -квантов используются для абсолютной калибровки шкалы и определения энергетического разрешения HPGe детектора.

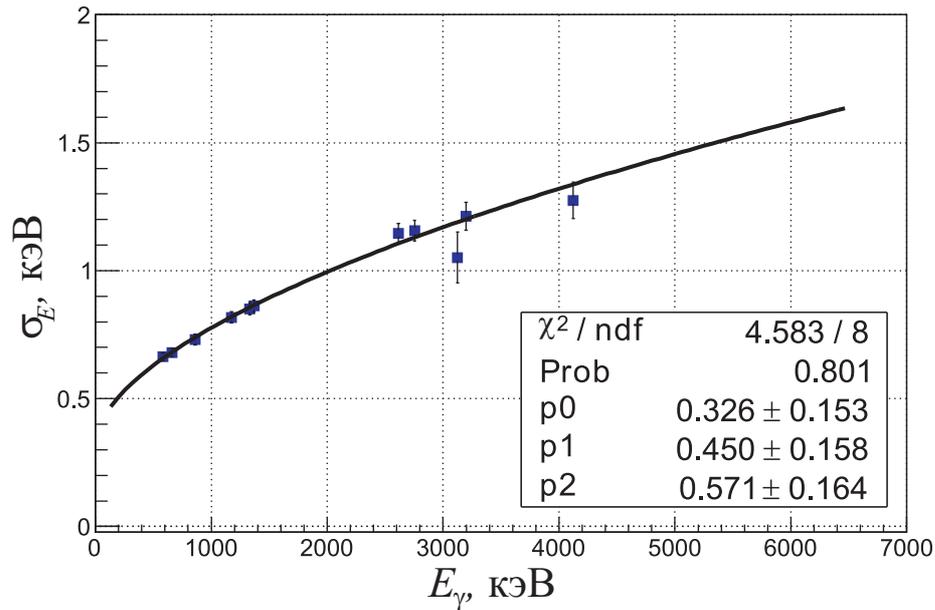


Рис. 8.6: Зависимость энергетического разрешения HPGe детектора от энергии γ -квантов (точки) и фитирующая функция $R(x, p_0 \dots p_2 = p_0 + p_1 x^{p_2})$ (линия).

На ВЭПП-4М основными источниками систематических ошибок измерения энергии пучка методом ОКР являются следующие эффекты:

- необходимость экстраполяции энергетической шкалы от калибровочной линии с максимальной энергией (2.6 – 2.7 МэВ) до энергии комптоновского края (5 – 6 МэВ);
- искажение формы линии полного поглощения HPGe детектора при больших интенсивностях пучка;
- большая горизонтальная дисперсионная функция ($\eta_x = 89$ см) в области взаимодействия электронного пучка с лазерным излучением, которая может смещать измеряемую энергию от средней энергии пучка.

Во время набора статистики на пороге рождения τ -лептона в 2005 – 2007 годах ($E = 1777 \pm 5$ МэВ) было сделано 153 одновременных калибровки энергии пучка методами РД и ОКР. Измерения согласуются между собой с точностью около 50 кэВ или $\Delta E/E \sim 3 \cdot 10^{-5}$.

В 2010 году область взаимодействия лазерного пучка с электронным для системы измерения энергии методом ОКР была перенесена на новое место — в промежуток между магнитами NEM1 и NEM2. После удаления области взаимодействия лазерного излучения с пучком из места встречи и соответствующего перемещения детектора

работа системы измерения энергии не зависит от режима работы ВЭПП-4М: со светимостью или без нее. Теперь набор спектров ОКР на HPGe детекторе ведется непрерывно с одинаковой скоростью, за 15 минут энергия пучка измеряется со статистической ошибкой 50 кэВ.

Такая модификация системы позволила:

- предотвратить попадание в HPGe детектор жестких γ квантов от e^+/e^- рассеяния на малые углы, измерения энергии ведутся параллельно с набором статистики детектором КЕДР, а монитор светимости не нужно двигать;
- восстановить схему лазерной калибровки системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР.

Кроме того, в 2010 году калибровка энергетической шкалы HPGe детектора дополнена линией 6.13 МэВ от Pu-C13 источника. Это позволило уменьшить систематическую ошибку метода до $(1.3 - 2.0) \cdot 10^{-5}$ в диапазоне энергий $J/\psi - \psi(2s)$ (1.55 – 1.85 ГэВ). На рис. 8.7 приведен пример совместного измерения энергии пучка ВЭПП-4М в течение суток методами ОКР и резонансной деполяризации (РД).

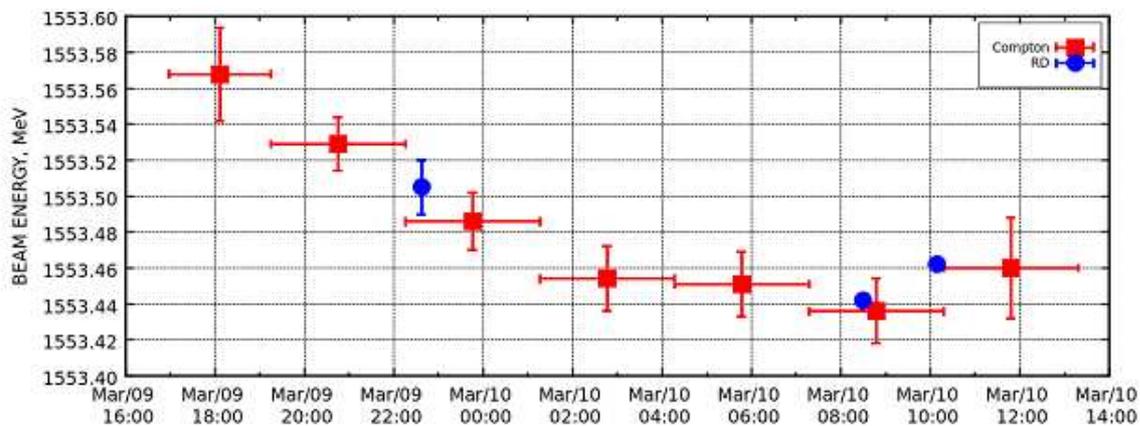


Рис. 8.7: Измерение энергии пучка ВЭПП-4М методами ОКР и РД.

В 2010 году экспериментально изучена применимость метода обратного комптоновского рассеяния для калибровки энергии пучка выше 2 ГэВ. На энергии пучка 3 ГэВ точность метода — 500 кэВ — достаточна для эксперимента по измерению R в этой области энергий.

9 Управление и автоматизация

9.1 Система управления

На ускорительном комплексе ВЭПП-4 используются свыше пятисот генераторов и источников питания различного типа: стабилизированные источники постоянного тока разной мощности, генераторы импульсного тока и напряжения, высоковольтные источники постоянного напряжения. Для управления оборудованием используется около трех тысяч управляющих и измерительных каналов электроники.

Система управления (СУ) комплекса ВЭПП-4 [122] в современной конфигурации была создана в 1985 – 1995 годах.

Первый вариант СУ комплекса ВЭПП-4 был разработан к 1980 году и базировался на использовании ЭВМ серии ОДРА-1300 (польский аналог английской ЭВМ ICL-1900). Основой программного обеспечения являлась существенно модернизированная операционная система (ОС) этих машин EXEC под новым названием VGJP. Управляющая и измерительная электроника (в основном разработки ИЯФ СО РАН в стандарте «ВИШНЯ») подключалась к ЭВМ через высокоскоростную (на то время) систему связи, также разработанную в ИЯФ, и все взаимодействие с электроникой выполнялось непосредственно из ЭВМ.

В конце 1970-х годов в системах управления начал активно внедряться стандарт КАМАК, позволяющий интегрировать в одном крейте разнообразную электронику, подсоединяемую к высокоскоростной шине для передачи данных. Это, в свою очередь, потребовало создания эффективного крейт-контроллера. После ряда итераций в качестве такого контроллера было решено разработать микрокомпьютер с системой команд основных машин ОДРА-1300, дополненной рядом специализированных команд для работы с магистралью КАМАК. В 1982 – 83 гг. такой микрокомпьютер, получивший название «Одренок» [123], был создан. Компьютер имел следующие параметры: 24-разрядное слово; универсальная система команд; 64 – 256 килослов оперативной памяти; режимы — «обычный» и «супервизор»; производительность — примерно эквивалентна IBM PC-286.

В 1983-84 гг. для «Одренка» была разработана операционная система ОДОС [124], реализующая как универсальные, так и специфичные для управления функции (ряд механизмов межпроцессного взаимодействия, спецрежимы для программ, синхронизацию процессов с работой подсистем комплекса и т.п.). ОДОС поддерживает мультипрограммное исполнение до 40 процессов (10 программ и 30 внутренних процессов). Достаточно высокая надежность и сравнительная простота эксплуатации «Одренка» с данной ОС, включение в нее поддержки работы с жесткими дисками, а также создание эффективных систем разработки программ привели, в конечном счете, к полной замене в системах управления ИЯФ машин ОДРА-1300 на «Одренок».

Решающим фактором, способствующим распространению стандарта КАМАК и «Одренка» в системах управления ускорителями, было создание в ИЯФ широкого ассортимента контрольно-измерительной электроники в стандарте КАМАК: ЦАПы и АЦП различной разрядности, время-цифровые преобразователи, управляемые линии задержки, различные регистры ввода/вывода и т.д.

В середине 1990-х годов стали проявляться проблемы с эксплуатацией алфавитно-цифровых терминалов (их просто перестали производить) и жестких дисков (старые модели выходили из эксплуатации, для новых требовались разработки адаптеров КАМАК с интерфейсами). Кроме того, система, базирующаяся на «Одренке», не удовле-

творяла растущим потребностям по обработке, визуализации и архивации данных. Существенные недостатки проявлялись и в возможностях межкомпьютерного обмена, ограниченных старыми системами связи.

Следующим шагом развития СУ ВЭПП-4 явилось сопряжение «Одрят» через протокол Ethernet с персональными компьютерами IBM PC под управлением ОС Linux [125]. В 1995 – 96 гг. был разработан адаптер КАМАК-Ethernet, его поддержка с большим количеством сетевых протоколов включена в ОДОС, а для PC разработаны файловый сервер и эмуляторы алфавитно-цифрового и графического терминалов. С подключением PC к системе управления появилась возможность для архивации данных в практически неограниченном объеме. Кроме того, использование PC позволяет выполнять обработку данных со скоростью в тысячи раз быстрее, чем на «Одренке», и по результатам обработки отдавать соответствующие команды на исполнение в «Одрята».

В таком варианте система управления комплексом ВЭПП-4 функционирует по настоящее время [122]. Основным набором электроники контроля и управления по-прежнему являются модули в стандарте КАМАК, а основным управляющим контроллером — «Одренок».

В таблице 9.1 приведена информация о функциональном назначении микрокомпьютеров «Одренок», распределении аппаратуры КАМАК и контрольно-измерительных каналов.

Таблица 9.1: Назначение микрокомпьютеров «Одренок» в СУ ВЭПП-4.

Одренок	Назначение	крей- тов	моду- лей	упр. кан.	изм. кан.
MSVEPP-4	Упр-е магнитной системой ВЭПП-4М	9	77	330	583
BEAMV-4	Диагностика пучка ВЭПП-4М	7	96	-	280
MSV3	Упр-е магнитной системой ВЭПП-3	6	42	125	80
RFV3	Управление ВЧ системой ВЭПП-3	2	22	330	583
BEAMV-3	Диагностика пучка ВЭПП-3	4	77	30	15
URO	Управление инжектором «Позитрон»	4	41	-	100
IPO	Контроль инжектора «Позитрон»	4	47	1	107
CHAN	Упр-е каналом ВЭПП-3 – ВЭПП-4М	8	75	135	110
BEAMPO	Диагностика пучка в каналах перепуска	3	26	24	348
CONTROL	Контроль вакуума и температуры	8	27	-	710
RADIAC	Контроль радиационной обстановки	3	26	-	36
FOTHSCAN	Контр. положения пучка СИ ВЭПП-3	1	6	-	2
Итого		64	568	782	2401

В настоящее время 12 «Одрят» и 8 PC, выполняющих функции пультовых операторских машин, объединены в локальный сегмент Ethernet (рис. 9.1).

На одной из PC работает файловый сервер «Одрят», обеспечивающий загрузку в «Одрята» операционной системы и прикладных программ, работу «Одрят» с файлами на жестком диске PC, информирование всех программ СУ о состоянии всех

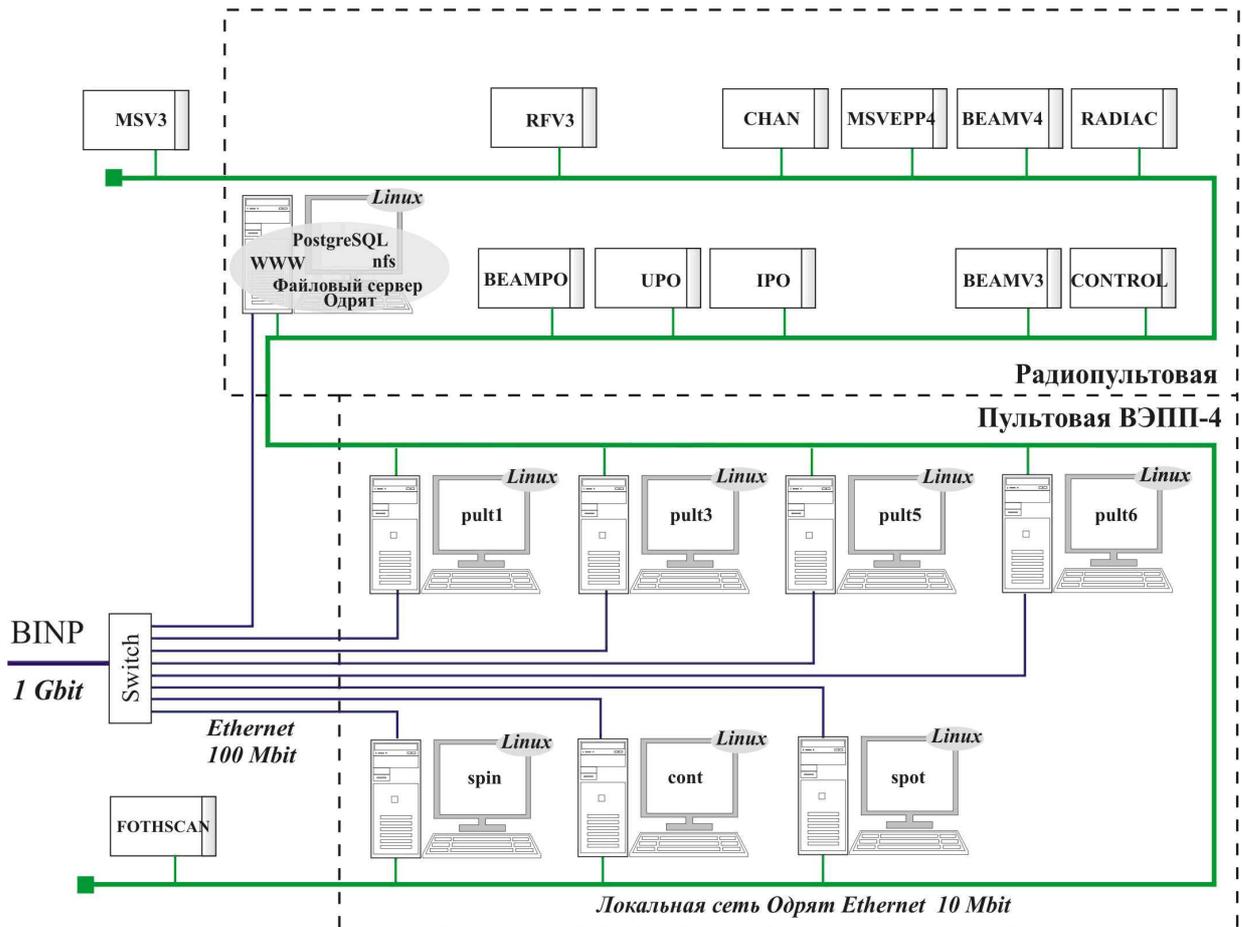


Рис. 9.1: Конфигурация компьютеров СУ ВЭПП-4.

подсистем комплекса (один раз в секунду файл, в котором собираются эти сведения, широкополосным способом передается в локальную сеть).

Другой сервер поддерживает систему сбора детальной информации о параметрах работы всего комплекса. РС используются не только как виртуальные терминалы для «Одрят» и дисплеи для отображения графической информации, но и для подключения новой диагностической и измерительной аппаратуры, а также для выполнения задач обработки данных, требующих высокой производительности компьютера.

Архитектура СУ ВЭПП-4 имеет два уровня. Нижний уровень предназначен для непосредственного взаимодействия с контрольно-измерительной аппаратурой, а также для сбора данных. Верхний уровень обеспечивает обработку визуализацию, и архивацию данных, контроль важных параметров комплекса, диагностику пучка, работу с базой данных, взаимодействие с экспериментальными установками и другие функции. Обмен информацией между уровнями реализуется через интегрированные в Linux сетевые протоколы ОДОС или через запись/чтение файлов на диске РС.

Программное обеспечение СУ в «Одрятах» представляет собой широкий набор программ (около 120) и файлов для управления установками комплекса, автоматизации процессов, проведения исследовательских и отладочных работ, включая:

- Редакцию и архивирование конфигураций аппаратуры и режимов работы;
- Взаимодействие с аппаратурой управления и контроля;
- Управление элементами установок;

- Автоматизацию процессов управления установками комплекса;
- Диагностику и визуализацию параметров пучков (ток, орбита и т.п.);
- Контроль состояния элементов, установок и инженерных систем;
- Тестирование аппаратуры и оборудования.

Программное обеспечение в РС включает:

- Файловый сервер «Одрят»;
- Программу-эмулятор графического дисплея «Одренка»;
- Программу визуализации орбиты пучка ВЭПП-3 и ВЭПП-4М;
- Программу измерения бетатронных функций ВЭПП-4М;
- Программу коррекции орбиты пучка ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

Кроме того, в РС работают несколько приложений для диагностики и визуализации параметров пучков, система термоконтроля элементов комплекса (см. Гл. 11), программа мониторинга фазовых колебаний пучка ВЭПП-4М, взаимодействующие с аппаратурой, подключенной непосредственно к РС (рис. 9.2).

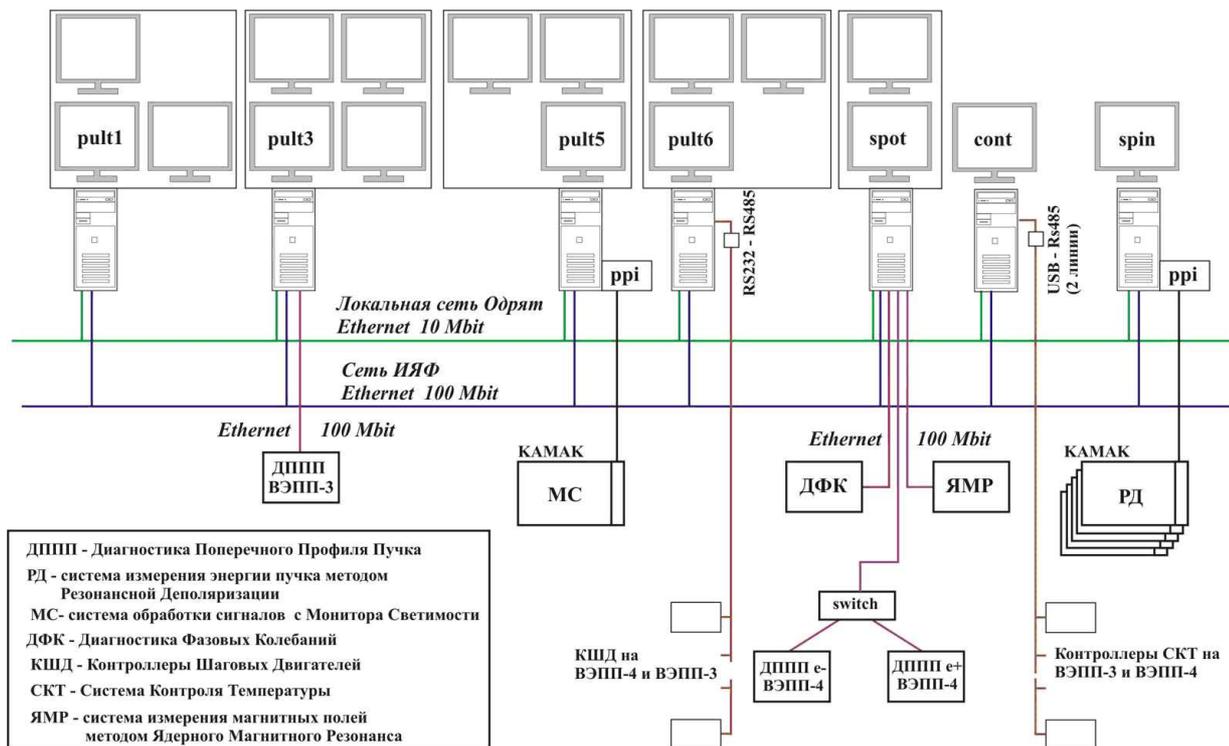


Рис. 9.2: Функциональное назначение пультовых РС СУ ВЭПП-4.

Большой объем информации о комплексе ВЭПП-4 представлен на web-странице <http://v4.inp.nsk.su/>, где находятся описания и основные параметры установок «Позитрон», ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, входные файлы для расчета магнитной структуры, подробные описания управляющих программ. Текущее состояние установок, включая токи и энергии пучков в ускорителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, режим работы, светимость и ряд других параметров отображается на динамически обновляемых страницах. Весьма полезными для работы в режиме эксперимента оказались on-line инструкции для операторов, расписание смен и электронный лабораторный журнал, также размещенные на web-сайте.

9.2 База данных параметров ВЭПП-4

Конфигурация системы управления комплекса ВЭПП-4 сложилась еще до широкого применения систем управления базами данных (СУБД). Основное количество информации считывается из аппаратуры в «Одренок», поэтому доступ к текущим данным со стороны РС организован через файловую систему, куда данные попадают из «Одрят» при помощи специального сервера.

Получаемые данные обычно переписываются в регулярно обновляемый файл, из которого они могут быть прочитаны, обработаны и сохранены в базе данных. Если требуется, то данные в файле не переписываются, а добавляются.

С появлением жестких дисков высокой емкости стало возможным хранить в базе данных историю работы комплекса, как минимум, за один сезон работы, что существенно расширило возможности для анализа и обработки данных. В отличие от файлов, база данных предоставляет эффективный доступ к хранимой информации. По желанию пользователя сервер базы данных может взять на себя всю необходимую работу по поиску, сортировке и элементарной математической обработке данных.

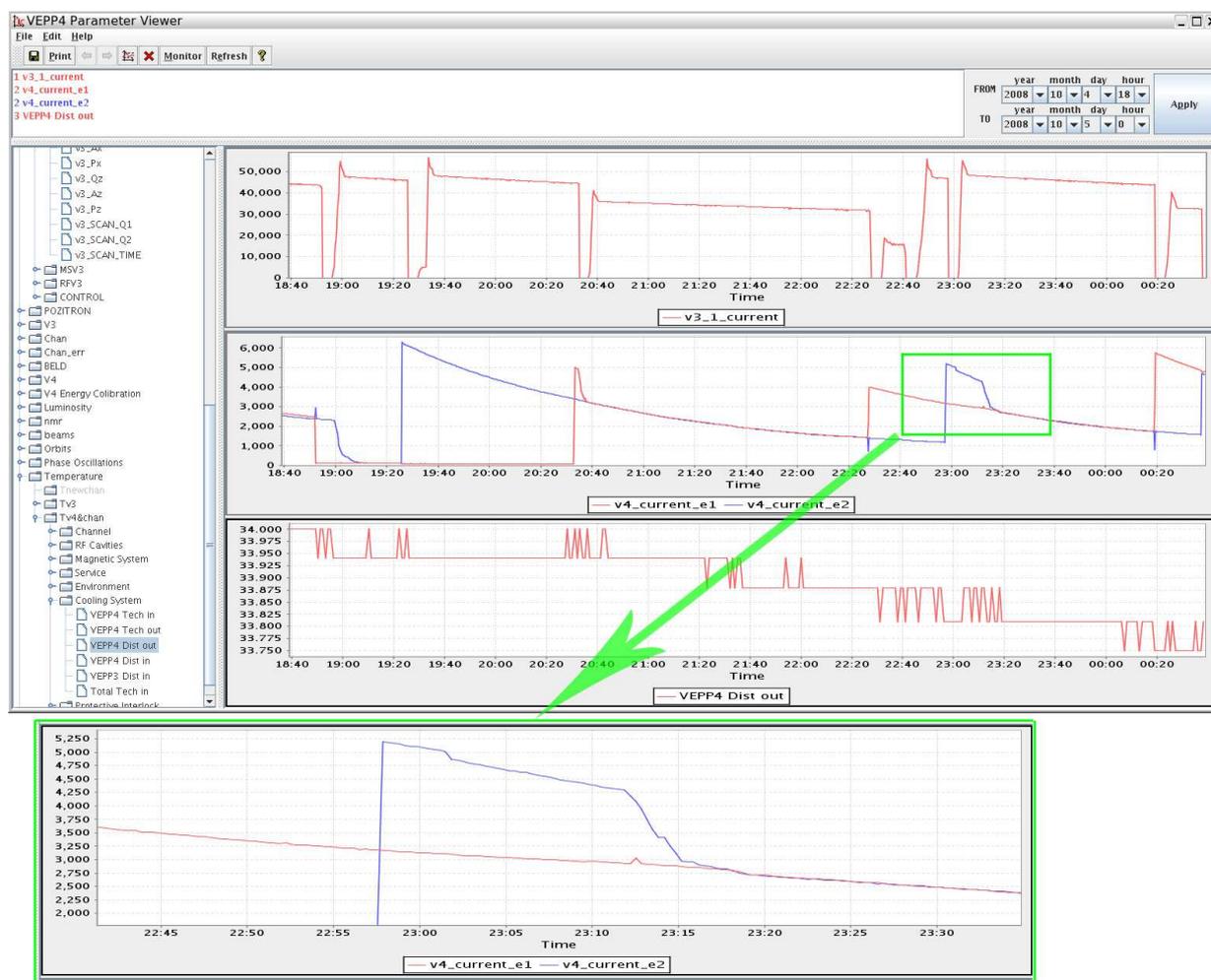


Рис. 9.3: Графический интерфейс базы данных комплекса ВЭПП-4.

База данных параметров комплекса ВЭПП-4 построена на основе СУБД PostgreSQL [126]. В нее непрерывно поступают измерения от полутора десятков измерительных и управляющих программ, работающих как в «Одрятах», так и в пультовых оператор-

ских РС. Всего периодически сохраняется около 2400 значений параметров. Процесс в РС, работающий с каким-либо определенным блоком данных, по заданному имени блока периодически запрашивает из базы данных список и свойства измеряемых величин, что необходимо для получения измерений и записи их в базу данных. Если возникает необходимость изменить конфигурацию блока параметров (например, переименовать, добавить или удалить параметры), то достаточно внести эти изменения в базу данных.

Данные, требующие непрерывного мониторинга (например, ток пучка, светимость, поля в магнитах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М и т.п.), записываются в базу данных 1 раз в секунду; измеренные значения температуры — 1 раз в 5 секунд. Большинство параметров элементов установок записывается по мере поступления новых значений (от 1 раза в секунду для инжектора «Позитрон» до 1 раза в 30 секунд для магнитов ВЭПП-4М). Запись редко обновляющихся данных, таких как коэффициент перепуска пучка, поля в импульсных магнитах канала ВЭПП-3 – ВЭПП-4М синхронизована с событием.

Визуализация данных осуществляется с помощью программы графического интерфейса, специально разработанного для ВЭПП-4. Доступ для клиентских C/C++ программ обеспечивается через прикладные программные интерфейсы `librq` и `librqxx`, представленные набором библиотечных функций. Также возможен доступ из клиентских программ, написанных на других языках.

Программа графического интерфейса запускается с любого Linux-компьютера и предоставляет возможность получать информацию из базы данных в графическом или текстовом виде, текстовые данные могут быть записаны в файл для последующей обработки. В окне приложения можно разместить несколько встроенных окон, в каждом из которых можно вывести любую комбинацию графиков. Для изменения масштаба графиков используется зуммер, выделенный фрагмент графика разворачивается на всю графическую плоскость (см. пример на рис. 9.3). Можно просматривать данные не только за заданный период времени, но и в режиме непрерывного мониторинга, т.е. по мере поступления в базу данных.

9.3 Автоматизация работы комплекса

Наиболее сложной задачей системы управления ВЭПП-4 является автоматизация работы комплекса в режиме набора статистики детектором КЕДР для экспериментов по физике высоких энергий. Время набора данных детектором определяется временем жизни пучков ВЭПП-4М в режиме столкновения 2-х электронных и 2-х позитронных сгустков. В то время как КЕДР ведет запись данных, два электронных или позитронных пучка накапливаются в бустерном кольце ВЭПП-3. Скорость накопления позитронов — 30 – 70 мкА/сек (зависит от накопленного тока), тогда как для электронов — приблизительно 2 мА/сек. В диапазоне энергий 1.5 – 2 ГэВ ток пучка, циркулирующего в коллайдере ВЭПП-4М, ограничен эффектами встречи и не превышает 3 мА. Принимая во внимание отношение периметров ВЭПП-3 и ВЭПП-4М $P_{\text{ВЭПП-4М}}/P_{\text{ВЭПП-3}} = 5$, потери пучка во время ускорения в ВЭПП-3 (10 – 15%) и эффективность инжекции пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М (70–90%), два сгустка по 20 мА каждый должны быть накоплены в ВЭПП-3 за время цикла набора данных.

Типичный рабочий цикл комплекса (рис. 9.4) включает в себя накопление позитронов в ВЭПП-3 (15 – 20 минут), ускорение до энергии выпуска (5 минут), выпуск поочередно обоих сгустков и инжекция в ВЭПП-4М, магнитный цикл и изменение по-

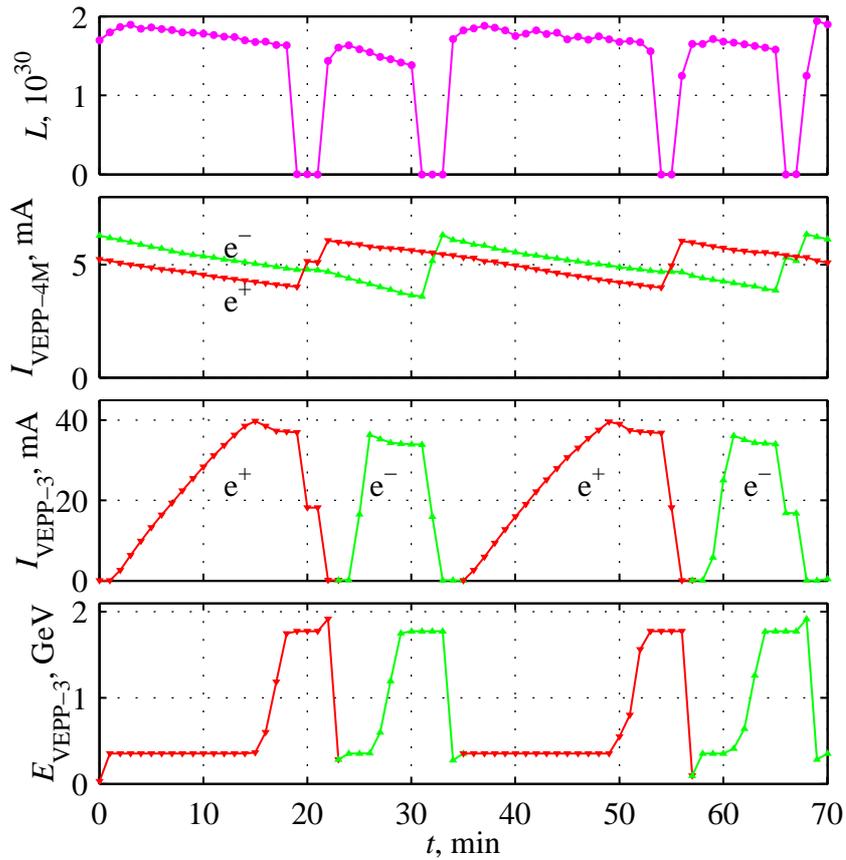


Рис. 9.4: Рабочий цикл ВЭПП-4 во время экспериментов по ФВЭ. Графики сверху вниз: светимость, ток пучка ВЭПП-4М, ток пучка ВЭПП-3, энергия ВЭПП-3.

лярности ВЭПП-3 и инжектора (5 минут), накопление электронов (1 – 2 минуты), их ускорение и инжекция в ВЭПП-4М (так же, как и в случае позитронов). Полное время, требуемое для обновления пучков в ВЭПП-4М, составляет 30 – 40 минут. Следует отметить, что пучки электронов и позитронов должны быть разведены в месте встречи на время инжекции, поскольку сильные возмущения пучка эффектами встречи приводят к потере интенсивности.

Для обеспечения автоматического процесса набора светимости в СУ был встроен элемент искусственного интеллекта, названный «Автопилотом». «Автопилот» периодически считывает необходимый набор параметров пучков и устройств, выполняет обработку данных и генерирует соответствующие команды программам управления и контроля. Режим работы задается оператором в конфигурационных файлах. Функциональная диаграмма «Автопилота» представлена на рис. 9.5.

«Автопилот» получает от других программ информацию о состоянии установок комплекса. Для оптимизации процесса набора статистики детектором КЕДР используются такие параметры как измеренная светимость, фоновая загрузка детектора, токи электронного и позитронного пучков. При оптимизации набора статистики программа производит пошаговую подстройку различных параметров ВЭПП-4М: коэффициента связи бетатронных колебаний, разведения пучков в месте встречи, величины нелинейности. По окончании цикла набора данных, выполняются действия по перепуску пучков в ВЭПП-4М. При этом пучки разводятся в месте встречи, производится подстройка импульсных магнитов в канале транспортировки пучка из ВЭПП-3

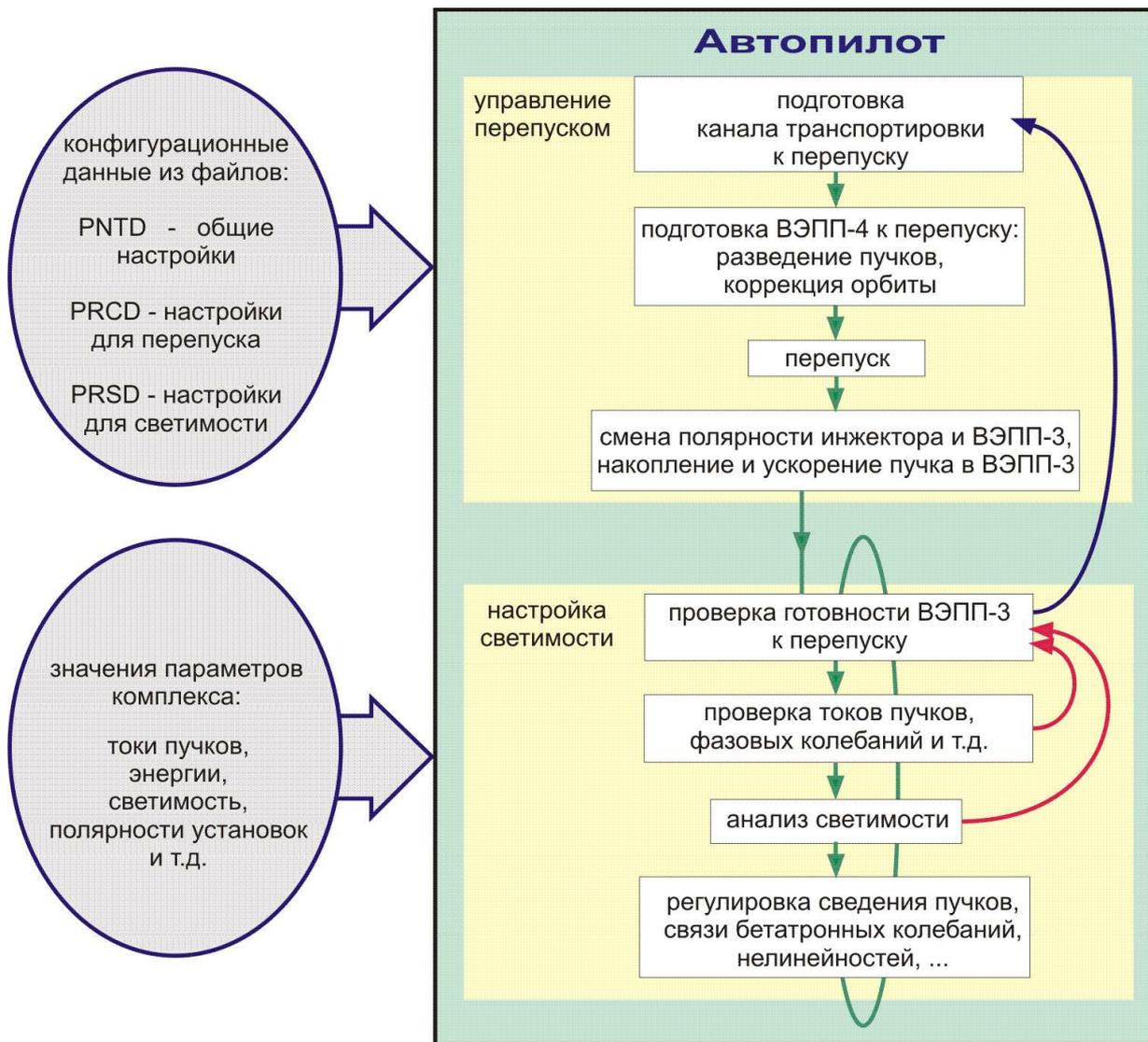


Рис. 9.5: Блок-диаграмма «Автопилота».

в ВЭПП-4М, поочередно инжектируются два сгустка электронов или позитронов. После этого дается команда смены полярности инжектора «Позитрон» и бустерного накопителя ВЭПП-3, запускается процесс цикла перемагничивания ВЭПП-3, после чего ВЭПП-3 переходит к накоплению пучков противоположной полярности.

Таким образом, «Автопилот» выполняет почти все рутинные операции, требуемые для оптимизации инжекции пучка и светимости. Процедура автоматизации оказалась весьма полезной, так как она минимизирует вероятность совершения ошибки при выполнении оператором многочисленных монотонных операций. В настоящее время вручную выполняется только калибровка энергии пучка методом резонансной деполяризации. В дальнейшем планируется автоматизировать и эту процедуру, несмотря на ее сложность.

10 Диагностика пучка

10.1 Системы датчиков положения пучка

Для измерения положения пучка в накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М используются электростатические датчики — пикап-электроды. Если электроды датчика имеют треугольную форму при виде сверху, то разность зарядов, наведенных на электроды длинным пучком, линейно зависит от поперечного смещения пучка на всей апертуре. Такие датчики установлены в полукольцах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, см. рис. 10.1*а*. Электроды линейного датчика положения пучка должны иметь довольно большую длину (порядка апертуры камеры), кроме того, импеданс электрода не согласован со стандартными 50-омными кабелями. Типичный датчик положения пучка, который должен работать на высоких частотах имеет четыре электрода в виде небольших дисков (button-electrodes), смонтированных заподлицо с вакуумной камерой. Каждый электрод подключен к внешней цепи через свой вакуумный ввод с согласованным импедансом 50 Ом. Такие датчики установлены в прямолинейных промежутках ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, см. рис. 10.1*б*.



Рис. 10.1: Электростатические датчики положения пучка, установленные в полукольцах (*а*) и промежутках (*б*) накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М .

На комплексе ВЭПП-4 применяется система измерения положения пучка с цифровой обработкой сигналов пикап-электродов [127], такими системами оснащены как ВЭПП-3, так и ВЭПП-4М. В качестве оконечного устройства аналогового измерительного канала используется схема выборки-хранения, выходной сигнал которой пропорционален пиковому напряжению импульсов, наведенных пучком на пикап-электроды. В рассматриваемой системе можно выделить две подсистемы.

Измерение орбиты пучка

Подсистема «Орбита» включает пикапы, распределенные по азимуту накопительного кольца, и предназначена для измерения равновесной орбиты пучка, дисперсионной функции, амплитудных и фазовых функций бетатронных колебаний. При измерении орбиты электроды выбранного пикапа по очереди подключаются к общему измерительному каналу с помощью ключей, и сигнал с выхода измерительного канала регистрируется интегрирующим АЦП. Вычисление координат с нормировкой на интенсивность пучка и с учетом различных поправок производится в управляющем компьютере. Для измерения структурных функций также используется последовательный опрос электродов, при этом на каждом такте регистрируется массив пооборотных сигналов с помощью быстрого АЦП с памятью.

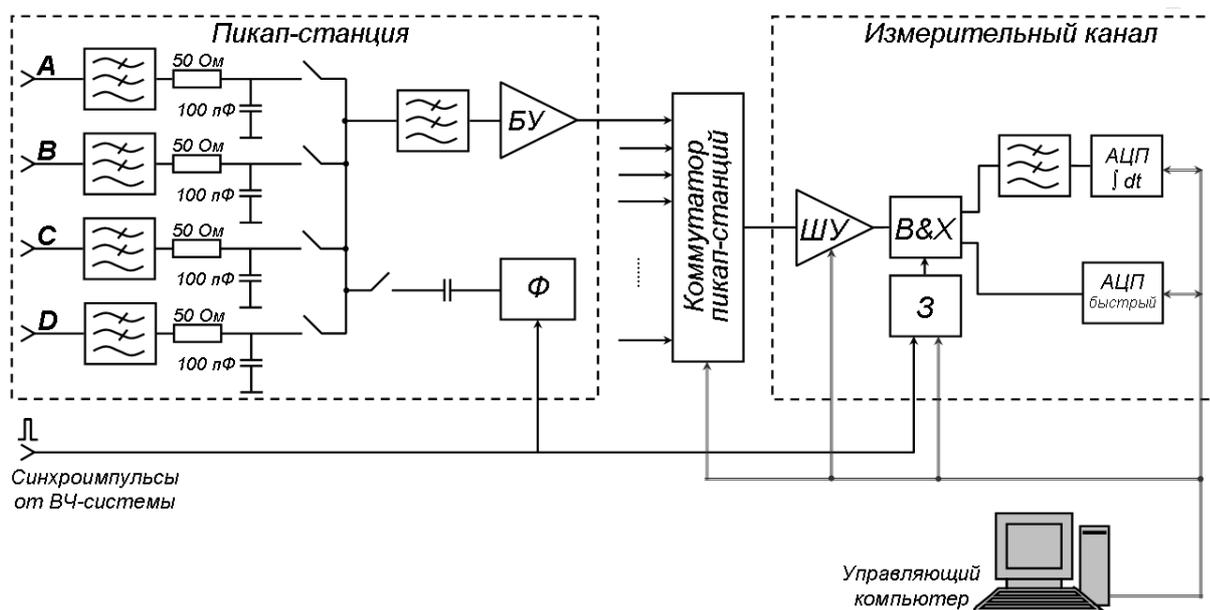


Рис. 10.2: Блок-схема системы с цифровой обработкой сигналов: БУ — буферный усилитель; ШУ — широкополосный усилитель; Ф — формирователь тестового сигнала; В&Х — схема выборки-хранения; З — блок задержки.

Структурная схема базового комплекта аппаратуры системы «Орбита» изображена на рис. 10.2. Первичная обработка сигналов пикап-электродов производится электроникой пикап-станций, расположенных в ускорительном зале, в непосредственной близости от пикапа. Для получения сигнала, форма и длительность которого пригодна для работы преобразователя «выборка/хранение» В&Х, короткий импульс (около 0.5 нс), наведенный пучком на пикап-электрод, проходит последовательность фильтров нижних частот и RC-цепочек, которые удлиняют импульс. На выходе пикап-станции имеется буферный усилитель, передающий этот сигнал в кабель. В пикап-станцию встроен также формирователь тестового сигнала, имитирующего пучок интенсивностью примерно 10^{10} частиц. Выходной сигнал пикап-станции имеет вид колоколообразного импульса длительностью 40 нс на полувывоте с последующим выбросом обратной полярности, экспоненциально затухающим с постоянной времени около 200 нс.

Сигнал от пикап-станции передается по кабелю на измерительный канал, аппаратура которого располагается вне ускорительного зала. На входе измерительного

канала находится основной широкополосный усилитель. Для обеспечения оптимального уровня выходного сигнала в широком диапазоне интенсивности пучка используется алгоритм автоматической установки усиления, реализованный в управляющих программах. Усиленный сигнал поступает на схему выборки-хранения (длительность выборки 10 нс), которая в момент прихода строб-импульса преобразует входной сигнал в квазипостоянное напряжение, присутствующее на выходе до следующего строб-импульса. Совмещение по времени строб-импульса с пиком сигнала каждой пикап-станции производится с помощью блока задержки опорного сигнала, поступающего от ВЧ-системы. Опорный сигнал представляет собой импульсы, следующие с частотой обращения пучка и привязанные к нулевой фазе ускоряющего ВЧ-напряжения.

Принципиальной особенностью данной системы является использование управляющего компьютера как неотъемлемой составной части. Переключение пикап-станций, задание требуемых значений коэффициента усиления и времени задержки строб-импульсов, а также управление АЦП и передача данных осуществляется управляющей программой, работающей в компьютере. Сочетание аппаратуры, регистрирующей сигналы пикап-электродов на каждом обороте пучка, с эффективными алгоритмами обработки данных позволяет решать широкий ряд задач диагностики пучка [128].

Диагностика инъекции

Подсистема «Впуск» состоит из отдельного пикапа (на ВЭПП-4М — двух пикапов) и четырех параллельных измерительных каналов, аналогичных тому, что используется в системе «Орбита». Система «Впуск» используется для пооборотного измерения тока и координат инжектируемого пучка, параметров бетатронных и синхротронных колебаний, а также для измерения соотношения токов в отдельных сгустках. Обработка данных, поставляемых системой «Впуск», с применением эффективных алгоритмов спектрального анализа [130, 131] позволяет изучать многие аспекты динамики пучка.

Измерение бета-функции

Одно из важных применений системы электростатических пикапов — измерение амплитудной функции бетатронных колебаний (бета-функции) с помощью спектрального анализа бетатронных колебаний, измеряемых пикапами на каждом обороте.

Известен метод измерения бета-функции в квадрупольных линзах, основанный на измерении сдвига бетатронной частоты от малой расстройки линзы. Наряду с простотой и надежностью данный метод обладает рядом недостатков. Во-первых, измеряется усредненное по длине линзы значение бета-функции. Во-вторых, магнитная структура устроена так, что квадрупольные линзы объединены в несколько семейств, каждое из которых запитано от одного источника. В таком случае асимметрию или локальные биения бета-функции возможно измерить, только если в каждой линзе предусмотрены дополнительные обмотки коррекции градиента с независимым питанием. В-третьих, если орбита пучка сильно отклоняется от нулевой, проходящей по центрам линз, то секступольная компонента магнитного поля дает значительный паразитный сдвиг бетатронной частоты, вносящий погрешность в измерения.

Метод измерения бета-функции с помощью датчиков, регистрирующих положение пучка на каждом обороте, был предложен в работе [129]. Используя пооборотные измерения когерентных бетатронных колебаний датчиками положения пучка, распределенными по азимуту ускорителя, можно определить бета-функцию в местах расположения датчиков. Когерентные бетатронные колебания возбуждаются импульсным

электромагнитным полем кикера, амплитуда колебаний определяется путем дискретного спектрального анализа массива измеренных выборок.

Практическая реализация метода [129] осложнялась недостаточным однооборотным разрешением датчиков положения пучка и довольно быстрой потерей когерентности колебаний. Применение алгоритмов уточнения дискретного преобразования Фурье [130, 131] позволило существенно повысить точность измерения амплитуды и фазы колебаний, и, как следствие, бета-функции [128, 132]. Достигнутая точность измерений сделала возможной глобальную коррекцию бета-функции.

Новая электроника датчиков положения пучка

Существующая система не позволяет измерять орбиту в режиме встречных пучков датчиками, расположенными вблизи мест встречи, поскольку временное разрешение недостаточно для разделения сигналов, наведенных на пикап-электроды электронным и позитронным сгустками. Для решения данной проблемы разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию новая электроника для датчиков положения пучка [133]. Основные отличия новой электроники:

- наличие полноценных пооборотных измерений для каждого пикапа;
- высокое временное разрешение, позволяющее одновременно измерять положение сгустков электронов и позитронов, отстоящих по времени на 20 нс;
- отсутствие электромеханических ключей (герконов), имеющих ограниченный ресурс.

Вся электроника для каждого пикапа размещена в пикап-станции, располагающейся рядом с пикапом (на расстоянии 1–2 м). Аналоговая обработка сигнала заключается в выделении с помощью ФНЧ низкочастотной части спектра сигнала. Широкая полоса ФНЧ (200 МГц) позволяет получить очень короткие сигналы с пикап-электрода, длительность сигнала на полувысоте составляет около 1.5 нс, таким образом возможно различать сигналы отдельных сгустков, отстоящих по времени до 20 нс. На данном обороте может измеряться положение только одного из сгустков электронов или позитронов, выбор сгустка осуществляется с помощью регулировки задержки импульса запуска АЦП относительного импульса «нулевой» сепаратрисы. К каждому электроду пикапа в данной системе подключен свой канал обработки сигнала. Это позволяет обеспечить пооборотные измерения. Результаты измерения в цифровом виде через Ethernet поступают из каждой пикап-станции в блок связи, размещенный в крейте VME. VME контроллер окончательно обрабатывает данные и передает их через Ethernet в управляющий компьютер, входящий в систему управления комплексом. Емкость встроенной памяти обеспечивает запись 8192 пооборотных измерений, возможно прореживание по времени, то есть запись каждого 2^n -го оборота ($n = 0, 2, \dots, 7$), что позволяет наблюдать процессы длительностью до нескольких секунд.

Пространственное разрешение пооборотных измерений зависит от тока пучка. Для пикапа NEP0, ближайшего к месту встречи пучков, измеренная величина разрешения составила около 30 мкм при токе пучка ВЭПП-4М, равном 1 мА. Для остальных пикапов разрешение должно быть примерно 15 мкм за счет меньшей величины геометрического фактора пикапа. Медленные измерения (орбита) осуществляются путем усреднения результатов пооборотных измерений за 50 – 100 тысяч оборотов (60 – 120 мс), время измерения может задаваться оператором. Величина разрешения для медленных измерений также зависит от тока пучка, при 1 мА величина среднеквадратичного

разброса измерений составила около 8 – 10 мкм, однако в эту измеренную величину входят и реальные колебания пучка. Для того, чтобы измерить реальное разрешение электроники, сигнал от одного из 4-х пикап-электродов через разветвитель подавался параллельно на 4 входа пикап-станции. Измеренное пространственное разрешение электроники пикапов NEP0, SEP0 при токе 1 мА составляет около 5 мкм, для остальных пикапов — примерно в 2 раза лучше.

10.2 Измерение тока пучка

На комплексе ВЭПП-4 для прецизионного измерения тока пучка в широком динамическом диапазоне используют трансформаторный датчик, выходным сигналом которого является постоянное напряжение, пропорциональное току пучка. Такой датчик называют трансформатором постоянного тока (DC Current Transformer, DCCT). Снижение до нуля нижней границы полосы частот трансформаторного датчика тока достигается с помощью магнитного модулятора, работа которого базируется на нелинейности кривой намагничивания ферромагнитных материалов. Магнитомодуляционный измеритель постоянной составляющей тока пучка в накопителе, разработанный в ИЯФ СО РАН, описан в [134]. Датчик измерителя размещается на вакуумной камере накопителя и состоит из двух кольцевых пермаллоевых сердечников, на каждом из которых расположены обмотки возбуждения и сигнальные обмотки. На обмотки возбуждения от генератора подается переменный ток, перемагничивающий сердечники датчика по предельной петле гистерезиса и таким образом модулирующий величину дифференциальной магнитной проницаемости сердечников с удвоенной частотой.

Если ток пучка равен нулю, то, в силу симметрии кривой намагничивания относительно осей B и H , ток измерительной катушки, намотанной вокруг обоих кольцевых сердечников, будет нулевым. Ненулевой ток пучка вносит асимметрию в кривую намагничивания и в результате приводит к появлению в спектре тока измерительной катушки четных гармоник частоты модуляции. Амплитуда второй гармоники (максимальной из четных) пропорциональна току пучка. Для расширения линейного диапазона и сокращения времени восстановления характеристик датчика в схему введена цепь обратной связи, магнитный поток, индуцированный током обратной связи, компенсирует поток, индуцированный током пучка. Для полной компенсации магнитного потока пучка ток в цепи обратной связи должен быть всегда равен току пучка.

Трансформаторные датчики тока пучка являются точными и надежными приборами, они используются для измерения среднего тока и времени жизни пучка в накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Шумовая погрешность датчиков, используемых на комплексе ВЭПП-4, не превышает 10 мкА в полосе частот 0 – 1 Гц.

10.3 Оптическая диагностика пучка

Методы диагностики, основанные на регистрации синхротронного излучения (СИ) релятивистских частиц в магнитном поле, позволяют определять многие интересные параметры и характеристики пучка. На комплексе ВЭПП-4 разработаны и внедрены уникальные методики оптической диагностики параметров пучков заряженных частиц.

Конфигурация системы оптической диагностики

Конфигурация системы оптической диагностики ВЭПП-4М [135] схематически изображена на рис. 10.3. СИ из поворотного магнита, отраженное охлаждаемым металлическим зеркалом, через кварцевое окно выводится из вакуумной камеры, разветвляется полупрозрачными зеркалами на несколько каналов и регистрируется набором датчиков, расположенных на оптической скамье. Геометрические преобразования изображения пучка осуществляются с помощью объективов, регулировка интенсивности — с помощью дистанционно управляемых светофильтров. Для калибровки оптических приборов в системе установлены источники света. Внешний вид оптической скамьи с размещенными на ней приборами диагностики пучка показан на рис. 10.4.

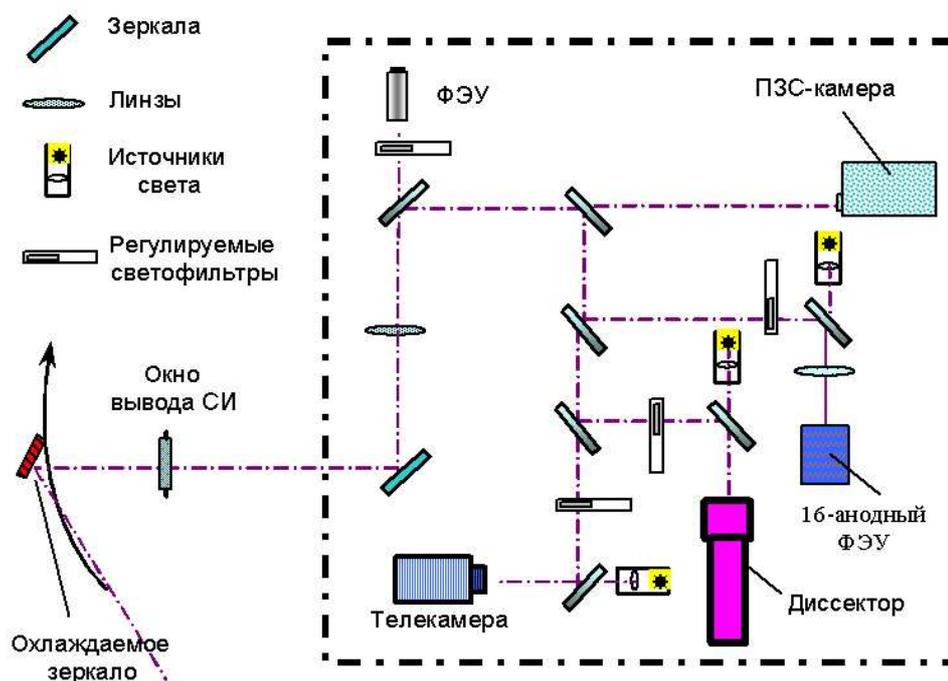


Рис. 10.3: Система оптической диагностики ВЭПП-4М.



Рис. 10.4: Внешний вид системы оптической диагностики.

Визуальное наблюдение пучка осуществляется с помощью телекамеры. Для поперотной регистрации пучков малой интенсивности используется ФЭУ, для измерения поперечных размеров пучка — ПЗС-камера, продольного размера — диссектор.

Диссектор

Для определения продольного размера пучка в накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М применяется стробоскопический вариант электронно-оптической хронографии. Поскольку характерная длина сгустка — порядка нескольких сантиметров, регистрирующая аппаратура должна обладать временным разрешением не хуже $3 \cdot 10^{-11}$ с в сочетании с чувствительностью, достаточной для измерения размеров пучков малой интенсивности. В качестве электронно-оптического преобразователя применяется диссектор, в котором, в отличие от обычного электронно-оптического преобразователя, вместо люминесцентного экрана устанавливается диафрагма с малым отверстием.



Рис. 10.5: Диссектор.

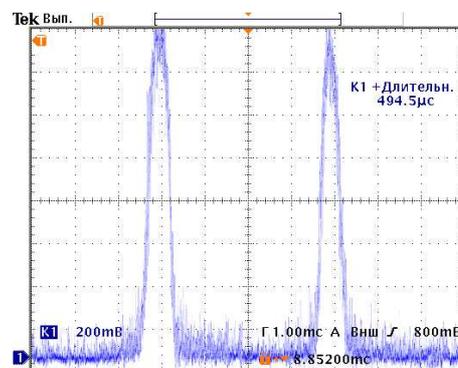


Рис. 10.6: Сигнал диссектора.

Принцип работы прибора подробно описан в [136], внешний вид представлен на рис. 10.5, осциллограмма продольного распределения плотности пучка ВЭПП-4М, измеренного диссектором — на рис. 10.6. Если на фотокатод диссектора спроецировано точечное изображение источника импульсного излучения с временным распределением $I(t)$, то при стабильных параметрах входного импульса ток анода $I_a(t)$ вторично-электронного умножителя повторит форму исследуемого сигнала $I(t)$ с коэффициентом трансформации порядка 10^6 , т.е. интервалу 1 мс на осциллограмме рис. 10.6 соответствует 1 нс в исследуемом сигнале.

ПЗС-матрица

Оптико-электронный преобразователь на основе прибора с зарядовой связью — ПЗС-матрица — используется в диагностике пучков частиц для получения двумерного изображения поперечного распределения плотности пучка по синхротронному или оптическому переходному излучению. В каналах транспортировки пучков ПЗС-матрицы применяются в режиме «одиночный кадр» для регистрации света люминофорных экранов. На комплексе ВЭПП-4 ПЗС-матрицы SONY ICX084AL используются для определения поперечного положения и размера электронных и позитронных пучков в накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М [137]. На рис. 10.7 приведен пример вывода программы обработки данных, измеренных ПЗС-матрицей, установленной на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М.

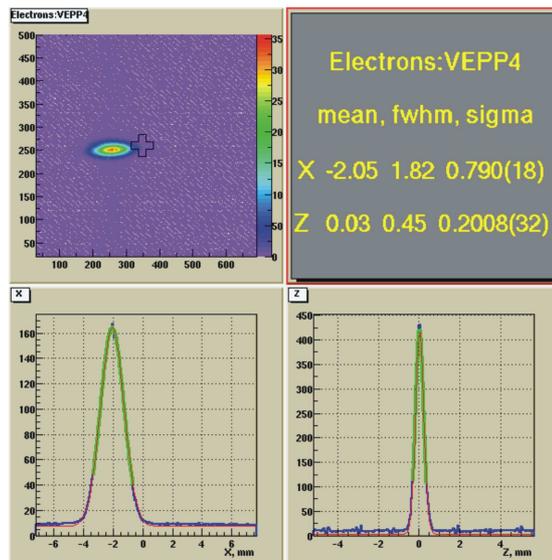


Рис. 10.7: Поперечное распределение плотности пучка, измеренное ПЗС-матрицей.

При использовании ПЗС-матриц промышленного производства в целях диагностики пучка необходимо точно знать их технические характеристики. Паспортных данных обычно недостаточно, так как требования, предъявляемые к матрицам, используемым для прецизионных измерений, гораздо выше, чем в обычной области применения ПЗС-матриц — производстве фото- и видеотехники. Для количественного измерения параметров пучка с помощью ПЗС-матриц на комплексе ВЭПП-4 были экспериментально определены следующие величины: чувствительность, уровень насыщения, динамический и линейный диапазоны.

Для измерения чувствительности поверхность матрицы равномерно засвечивается, чтобы величина накопленного заряда была одинаковой для всех ячеек. При таких условиях распределение амплитуды сигнала по ячейкам матрицы подчиняется статистике Пуассона (в предположении одинаковой чувствительности ячеек). В цифровой код АЦП, представляющий собой дискретную последовательность значений, пропорциональных зарядам ячеек матрицы, кроме полезного светового сигнала входят также постоянное смещение нулевого уровня и темновой сигнал, т. е. шум ячеек в отсутствие внешней засветки, основной причиной которого является термоэлектронная эмиссия. Когда заряд, накопленный в ячейках ПЗС, выводится из матрицы, преобразуется в напряжение и усиливается, в каждой ячейке появляется дополнительный шум, называемый шумом считывания, его можно представить как некоторый базовый уровень сигнала, который присутствует даже при отсутствии экспозиции. Этот шум и определяет чувствительность камеры. Для матрицы SONY ICX084AL, используемой на комплексе ВЭПП-4, чувствительность составляет около 15 фотоэлектронов на ячейку. Минимальный ток пучка в накопителе ВЭПП-3, при котором возможно производить анализ полученных данных, составляет величину порядка 10^{-9} А (около 1000 электронов).

Поскольку электрическая емкость ячейки матрицы не безгранична, существует насыщение накопленного заряда, с которым связаны величины динамического диапазона и диапазона линейности. Для приборов с зарядовой связью динамический диапазон — это отношение максимального заряда, который может быть накоплен в ячейке, к шуму считывания. В диапазоне линейности число электронов, собираемых

в ячейке, прямо пропорционально числу фотонов, попавших на светочувствительный элемент. Для определения динамического диапазона и диапазона линейности матрица равномерно засвечивается с интенсивностью, достаточной для того, чтобы процесс накопления заряда вышел на насыщение. Уровни насыщения зависят от интенсивности света, так как время жизни фотоэлектронов в ячейке матрицы ограничено и есть конечная скорость утечки фотоэлектронов из ячейки. Эта скорость растет с увеличением числа накопленных в ячейке фотоэлектронов. В свою очередь, чем выше будет интенсивность света, тем лучше будет компенсироваться утечка фотоэлектронов, следовательно, тем выше будет и уровень насыщения. Для данной матрицы уровень насыщения соответствует $2.7 \cdot 10^4$ электронов, при этом динамический диапазон составляет 1700 : 1, а линейный 1200 : 1.

Кроме вышеописанных измерений, имеет смысл также проверить линейность амплитуды выходного сигнала при изменении коэффициента усиления, а также оценить величину темнового сигнала, основной составляющей которого является термоэлектронная эмиссия, в зависимости от времени накопления заряда.

Быстрый измеритель профиля пучка

Уникальный прибор [138], разработанный в ИЯФ СО РАН на основе многоанодного ФЭУ (Multianode photomultiplier tube, МАРМТ), позволяет проводить поворотное измерение положения центра масс и поперечных размеров пучка, а также анализ частот колебаний пучка в диапазоне от нескольких герц до сотен килогерц. Внешний вид и схема устройства 16-анодного ФЭУ Hamamatsu R5900U-00-L16 показаны на рис. 10.8. Прибор имеет 16 каналов шириной 1 мм, минимальная рабочая поверхность одного канала — $0.8 \times 16 \text{ мм}^2$. Время нарастания сигнала 0.6 нс. Спектральная чувствительность ФЭУ максимальна на длине волны 450 нм, размер входного окна — $30 \times 30 \text{ мм}^2$.

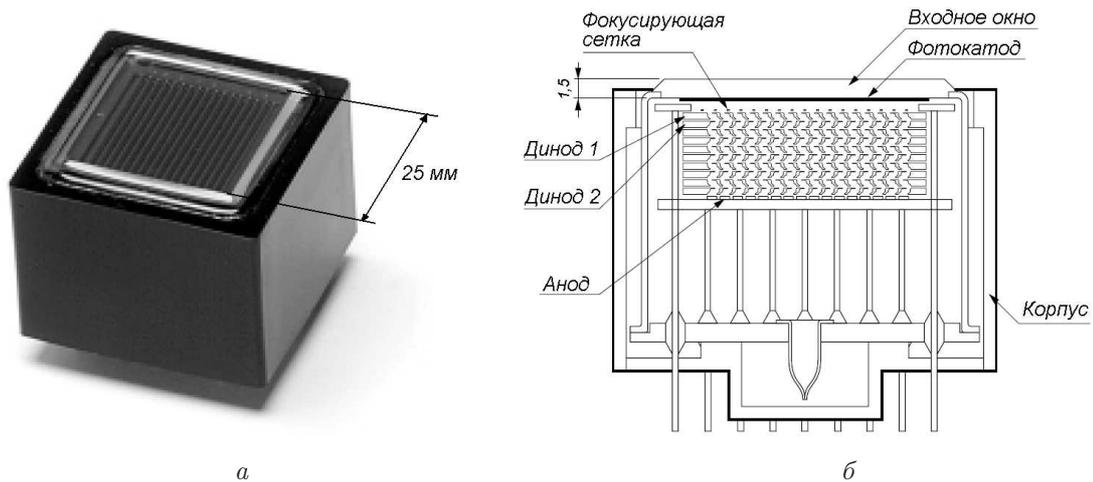


Рис. 10.8: 16-анодный ФЭУ Hamamatsu R5900U-00-L16: *а* — фотография, *б* — схема

Кроме ФЭУ, в состав прибора входит 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), встроенная память размером 4 Мб, контроллер и 100-Мбит интерфейс Ethernet. Объем памяти позволяет сохранять до 2^{17} измеренных поперечных сечений пучка в одной плоскости, по 16 точек каждое. Период измерений можно варьировать

в диапазоне $(1-2^8)T_0$, где T_0 — период обращения пучка ($T_0 = 1220$ нс для электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М). Таким образом, прибор позволяет получить информацию о поперечном движении пучка в полосе частот шириной 10 Гц–1 МГц в течение 20–0.16 с соответственно.

Для достижения оптимального пространственного разрешения используется оптическая система увеличения изображения пучка, проецируемого на фотокатод многоанодного ФЭУ. Высокая чувствительность ФЭУ в сочетании с дистанционно управляемыми светофильтрами обеспечивает широкий динамический диапазон прибора — до 10^3 , что соответствует рабочему диапазону тока пучка ВЭПП-4М от 10 мкА до 10 мА.

Многоанодный ФЭУ в настоящее время является практически единственным прибором, позволяющим регистрировать эволюцию поперечного размера пучка в течение большого числа последовательных оборотов.

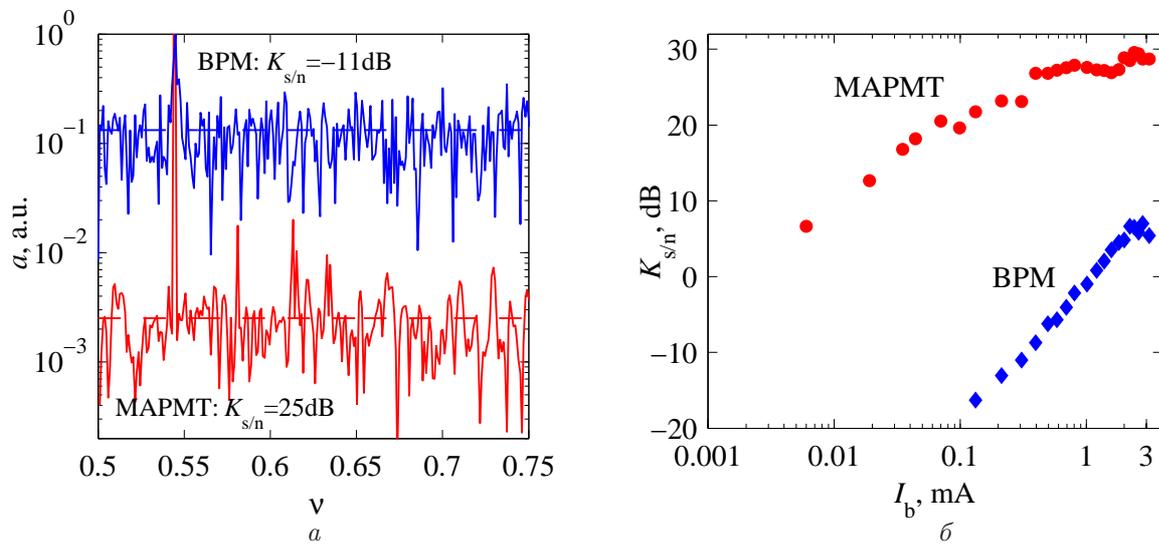


Рис. 10.9: Спектры колебаний пучка (а), измеренные многоанодным ФЭУ (МАРМТ) и электростатическим пикапом (ВРМ); соответствующее отношение сигнал/шум (б)

На пучке ВЭПП-4М проведены измерения чувствительности многоанодного ФЭУ в сравнении со стандартным электростатическим датчиком положения пучка [127]. Измерялось отношение сигнал/шум в зависимости от тока пучка в диапазоне от 3 мкА до 3 мА. Когерентные бетатронные колебания возбуждались с помощью импульсного кикера, пооборотные измерения поперечного положения пучка производились обоими приборами одновременно. Отношение сигнал/шум в полосе частот с верхней границей, равной частоте обращения, определено как

$$K_{s/n} = 20 \lg \frac{a_s}{\langle a_n \rangle \sqrt{N}} \text{ дБ}, \quad (10.19)$$

где a_s — амплитуда бетатронных колебаний (полезный сигнал) и $\langle a_n \rangle$ — средняя амплитуда шумовых гармоник, полученные путем спектрального анализа измеренных данных; N — число пооборотных выборок колебаний. Примеры спектров колебаний пучка, измеренных многоанодным ФЭУ (МАРМТ) и электростатическим датчиком положения пучка (ВРМ) приведены на рис. 10.9а. Ток пучка 0.3 мА, амплитуда колебаний — около 1 мм, $N = 1024$. На рис. 10.9б показано измеренное отношение сигнал/шум для многоанодного ФЭУ и электростатического пикапа в зависимости от

тока пучка ВЭПП-4М. Видно, что многоанодный ФЭУ является существенно более чувствительным прибором для регистрации колебаний пучка, чем электростатический пикап.

Рентгеновская камера-обскура

Прецизионная стабилизация положения пучков в месте встречи производится с помощью рентгеновской многоточечной камеры-обскуры, регистрирующей СИ из ближайших к месту встречи магнитов [139]. Рентгеновская камера-обскура обладает такими же геометрическими свойствами, как и обычная камера-обскура для видимого света. Свет, проходя через достаточно малое отверстие, формирует перевернутое изображение источника с коэффициентом трансформации, равным D/d , где d — расстояние от источника до экрана, а D — расстояние от экрана до регистрирующего устройства (ПЗС-матрицы).

Если в металлическом экране сделать несколько отверстий, расположенных в линию на расстоянии около $3\sigma_{\perp}$ друг от друга (σ_{\perp} — поперечный размер пучка), то получим прибор, позволяющий одновременно измерять как поперечное положение, так и угол наклона пучка в точке излучения. Расстояние между крайними отверстиями должно быть около $3d\psi$, где ψ — угловая расходимость синхротронного излучения; d — расстояние от точки излучения до экрана.

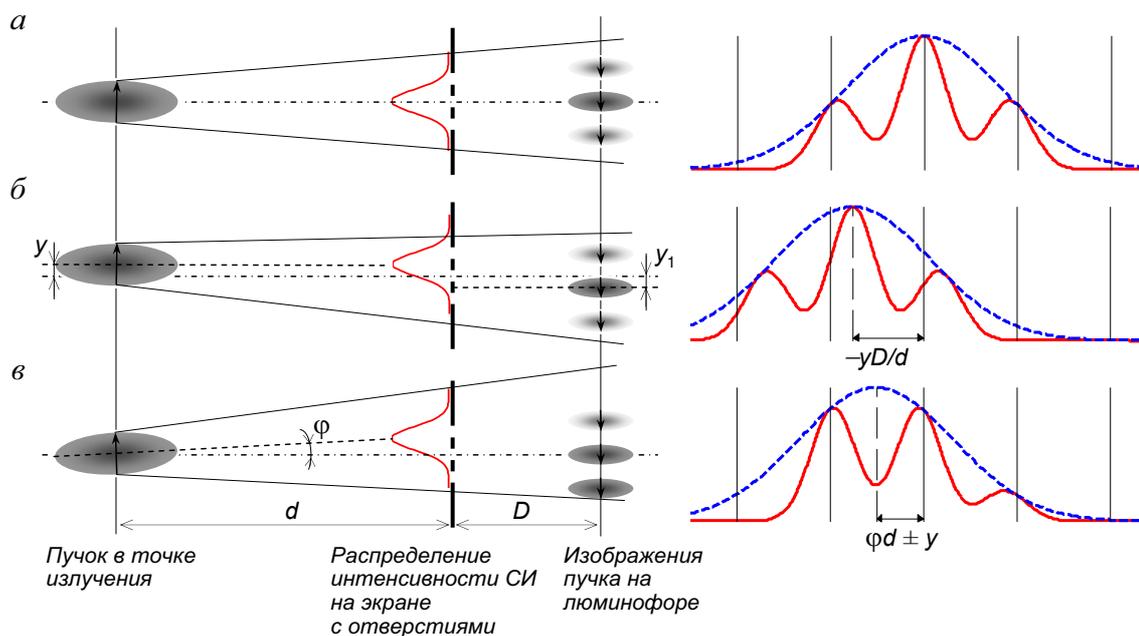


Рис. 10.10: Принцип измерения поперечной координаты и угла наклона пучка

Принцип работы прибора иллюстрирует рис. 10.10. Если поперечное смещение и угол наклона пучка равны нулю, рентгеновское синхротронное излучение создает на металлическом экране изображение пучка, центр которого находится точно посередине между крайними отверстиями, и суперпозиция изображений, сформированных отверстиями, образует на люминофоре симметричную фигуру, как это показано на рис. 10.10, а. Поперечное смещение пучка частиц без отклонения по углу приводит к сдвигу всех изображений на люминофоре, и, соответственно, их огибающей на $y_1 = -yD/d$, см. рис. 10.10, б. При наклоне пучка на угол φ без смещения в поперечной

плоскости сдвигается только огибающая изображений пучка на $y_2 = \varphi d$, поскольку сами изображения остаются на своих местах, а изменяется только их интенсивность (рис. 10.10, в).

Для построения изображения пучка камерой-обскурой используется мягкое рентгеновское излучение из поворотного магнита, выпускаемое через бериллиевую фольгу. Несколько изображений пучка, построенных обскурами на люминофоре, при помощи объектива переносится на ПЗС-матрицу и считывается в компьютер. На рис. 10.11а приведен пример изображений пучка, сформированных камерой-обскурой с шестью отверстиями, установленной на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М, а на рис. 10.11б — распределение интенсивности изображения, используемое для измерения поперечной координаты и угла наклона пучка.

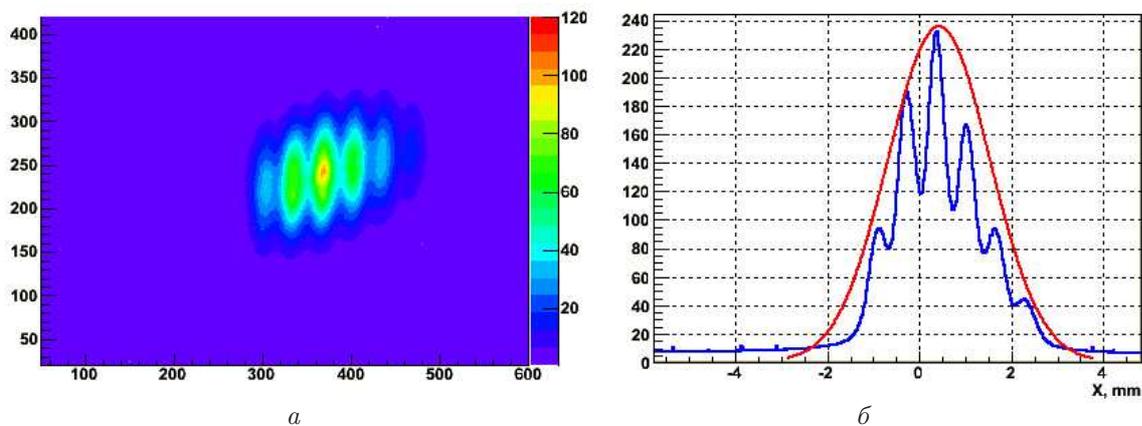


Рис. 10.11: Камера-обскура: *a* — двумерное изображение пучка; *b* — распределение интенсивности.

Калибровка пространственного и углового разрешения камеры-обскуры производилась с помощью системы измерения и коррекции орбиты пучка ВЭПП-4М. Измеренное угловое разрешение составляет около 2 мкрад в диапазоне угловых отклонений 50 мкрад. Превышение этой величины приводит к исчезновению одного из локальных максимумов. Измеренное пространственное разрешение — около 1.5 мкм в диапазоне 100 мкм. При выходе за пределы 100 мкм, также как и при чрезмерном наклоне пучка, исчезает один из локальных максимумов. Очевидно, и угловой и пространственный диапазоны обскуры могут быть расширены путем простого увеличения числа отверстий, однако в этом случае ужесточаются требования к проекционной оптике.

11 Системы измерения и стабилизации температуры

Эксперименты по измерению масс частиц с рекордной точностью, проведенные на комплексе ВЭПП-4, чрезвычайно чувствительны к температурному режиму как оборудования ускорительного комплекса, так и окружающей среды. Относительная точность калибровки энергии в экспериментах по физике высоких энергий достигает значения 10^{-6} . На таком уровне точности источниками систематических ошибок могут быть следующие факторы: вариация геометрических размеров магнитов из-за нестабильности температуры окружающей среды, изменение среднего радиуса кольца из-за теплового движения туннеля, изменение температуры воды, охлаждающей магнитные элементы ускорителя. На рис. 11.1 показаны суточные колебания энергии пучка (на уровне нескольких кэВ), вызванные изменениями температуры окружающей среды.

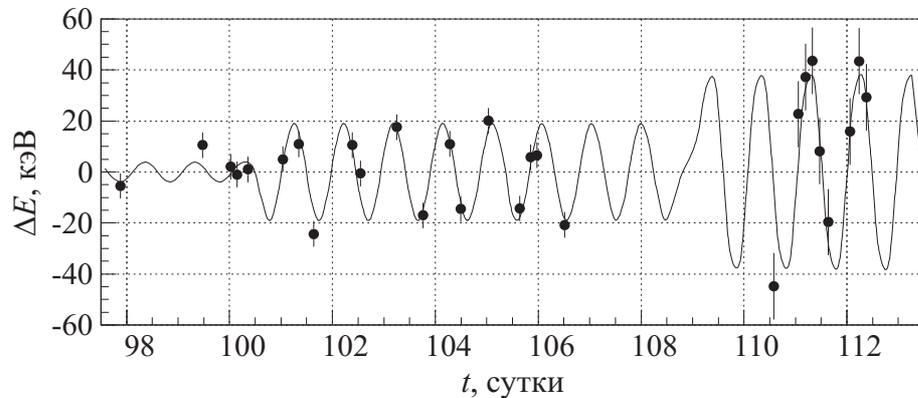


Рис. 11.1: Суточные колебания энергии пучка ВЭПП-4М.

Для определения энергии во время набора статистики детектором использовалась интерполяция с учетом следующих параметров: магнитное поле, измеряемое ЯМР магнитометром в калибровочном магните; температура калибровочного магнита; средние температуры кольца и охлаждающей воды; температура, измеряемая на некоторой глубине в стенах туннеля. Прецизионные эксперименты потребовали создания адекватной системы измерения соответствующих температур. Кроме того, необходимо выполнять своевременные отключения питания соответствующего оборудования в случае, если температура какого-либо магнитного элемента вышла за заданные пределы. Для решения этих задач разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию новая система контроля температуры [140, 141].

Базовые элементы системы — цифровой датчик температуры повышенной точности DS1631 [142] и программируемый 32-канальный контроллер температуры с управляемыми реле, разработанный в ИЯФ СО РАН. Основные характеристики датчика температуры: диапазон измеряемых температур от -25°C до $+125^{\circ}\text{C}$; разрешающая способность 0.06°C ; разброс показаний датчиков $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от 0°C до $+70^{\circ}\text{C}$, время преобразования 0.75 с. Разброс температур, точность и стабильность работы датчиков были подтверждены длительной серией специальных измерений.

Контроллер температуры предназначен для создания недорогих и надежных распределенных систем термоконтроля на крупных технологических и электрофизических установках. В его состав входят 8 твердотельных реле, которые могут использоваться для управления световой и звуковой сигнализацией, выполнения аварийных и иных оперативных переключений. Контроллеры подключаются к управляющему

компьютеру при помощи стандартного промышленного интерфейса RS485. К одной линии RS485 может быть подключено до 30 контроллеров. Такое подключение особенно эффективно при создании распределенных систем термоконтроля, в которых количество температурных датчиков достигает нескольких сотен штук, а расстояние между ними — нескольких сотен метров. Количество каналов измерения в одном контроллере — 32; период опроса всех 32-х датчиков — 900 мс; максимальное расстояние от датчиков до контроллера — 15 метров. Контроллер хранит измерения температуры подключенных датчиков, обновляя их каждую секунду. Реле могут управляться либо программой контроллера, либо программой компьютера. Управляющий компьютер имеет доступ к ПЗУ контроллера и может записать туда как режим работы для каждого реле, так и назначить любому датчику одно или два реле и температурные пороги срабатывания этих реле. Режим работы реле — это способ управления (по инициативе контроллера или компьютера); тип срабатывания (размыкание или замыкание подключенной электрической цепи).

Полное описание конфигурации системы и настройки, используемые для работы программы контроллера температуры, хранятся и обновляются по мере необходимости в базе данных комплекса ВЭПП-4 (см. Гл. 9). Три базовые таблицы и их дочерние таблицы описывают три сущности: электрическая цепь, подключаемая к реле контроллера; контроллер; датчик. Программа контроллера присваивает отсутствующему датчику значение температуры, равное -128°C . Поэтому для корректного управления реле, отсутствующим датчикам и датчикам, не участвующим в системе отключения питания магнитов, задаются нулевые номера реле и недостижимые температурные пороги срабатывания реле. Для этого в базе данных существует базовая таблица «отсутствующий датчик», дочерняя таблица «датчик».

Данные, регистрируемые в базе данных каждые 5 секунд — это значения температуры и ошибочные состояния элементов системы (линия, контроллер, датчик). В блокировке питания магнитов участвуют два реле контроллера, если к нему подключены блокирующие датчики. Одно реле — для включения звуковой сигнализации при достижении первого порога температуры (задано 55°C) хотя бы на одном блокирующем датчике контроллера. Другое реле — для отключения соответствующей цепи питания магнитов при достижении второго температурного порога (задано 60°C) хотя бы на одном блокирующем датчике контроллера.

Текущие значения температуры запрашиваются из базы данных программой визуализации перегревов и неисправных состояний системы и отражаются в порядке убывания в графическом окне монитора. Предусмотрена аппаратная звуковая сигнализация и цветовая маркировка. При необходимости звуковую сигнализацию можно отключить. По мере остывания перегретого магнита каждое реле возвращается в исходное состояние, а питание соответствующей группы магнитов может быть включено только вручную. Протяженность линии в тоннеле ВЭПП-4М с 25 контроллерами составляет около 500 м, протяженность линии в тоннеле ВЭПП-3 с 12 контроллерами — 115 м. В настоящее время установлено 283 измерительных и 206 блокировочных датчиков, таким образом температура измеряется почти в 500 точках.

Охлаждение систем ускорительного комплекса ВЭПП-4 осуществляется дистиллятом, циркулирующим по замкнутому контуру. Нагретый дистиллят охлаждается либо в теплообменниках оборотной технической водой, либо с помощью холодильной установки НТ-3000. Непрерывный мониторинг температуры охлаждающей воды важен для обеспечения эффективной работы установок комплекса, поскольку прецизионные эксперименты предъявляют жесткие требования к системам охлаждения: стабиль-

ность температуры, бесперебойность работы, динамичность при резких изменениях тепловыделения в широких пределах. На рис. 11.2 приведены графики температуры оборотной воды и дистиллята, охлаждающего ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, измеренные в течение суток. Эти данные доступны через web-интерфейс как для операторов ВЭПП-4, так и для инженерных служб Института, обеспечивающих работу комплекса.

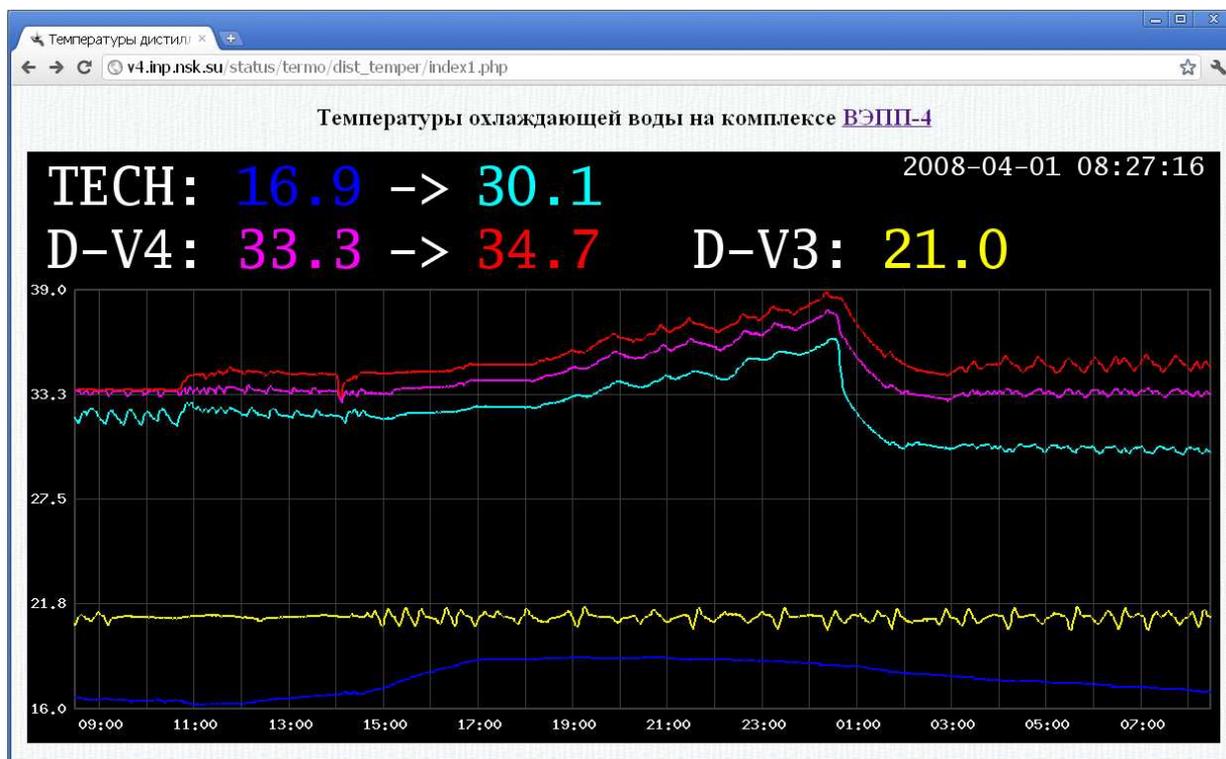


Рис. 11.2: Суточный мониторинг температуры охлаждающей воды.

В структуре ВЭПП-4М магниты с комбинированными функциями охлаждаются дистиллятом, циркулирующим по замкнутому контуру, который, в свою очередь, охлаждается в теплообменном аппарате технической водой, температура которой зависит от окружающей среды, условий охлаждения и т.п., и подвержена значительным суточным и сезонным колебаниям. Для поддержания температуры магнитов ВЭПП-4М в заданных пределах была разработана система термостабилизации охлаждающего дистиллята [26]. Температура дистиллята и технической воды на входе и на выходе теплообменника измеряется прецизионными термодатчиками. Поток технической воды в теплообменнике и, как следствие, эффективность теплообмена регулируется клапаном, управляемым программой, анализирующей измеренные температуры. Эффективность системы иллюстрирует рис. 11.3, где показаны температуры технической воды и дистиллята, измеренные в течение суток. Как видно, амплитуда суточных колебаний температуры дистиллята, охлаждающего магниты, составляет около 0.1°C , что примерно в 10 раз меньше, чем без термостабилизации.

При работе коллайдера ВЭПП-4М в режиме 2×2 сгустка может возникать неустойчивость продольного движения сгустков, приводящая к фазовым колебаниям с большой амплитудой. Причиной неустойчивости является резонансное возбуждение пучком высших мод колебаний ускоряющих резонаторов. Для подавления высших мод в каждом из пяти резонаторов предусмотрено по три управляемых механизма. При изменении температуры резонаторов происходит изменение его геометрических раз-

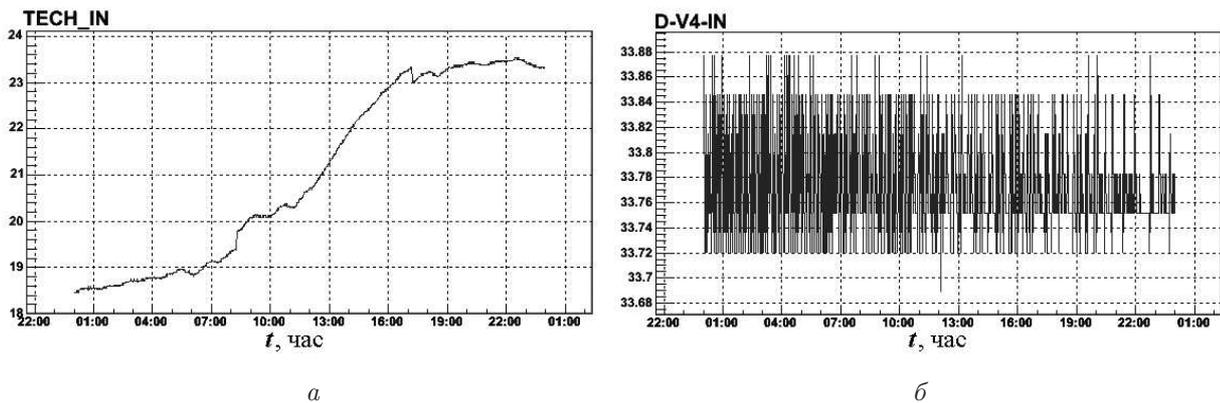


Рис. 11.3: Температура технической воды (*а*) и термостабилизированного дистиллята (*б*), охлаждающего магниты ВЭПП-4М.

меров, приводящее к сдвигу резонансных частот высших мод, и, как следствие, к развитию неустойчивости.

Резонаторы охлаждаются отдельным контуром дистиллята, и для стабилизации температуры резонаторов разработана система [26, 143], основанная на управляемых подогревателях дистиллята, позволяющая удерживать заданную температуру с точностью $0.05 - 0.1^\circ\text{C}$ при протоке около 10 л/мин. Температура измеряется на входе и выходе нагревателя с помощью термодатчиков, обладающих чувствительностью около 10 мВ/градус, и поступает в автономный микропроцессор ADAM [144], производящий PID-регулирование мощности подогрева и включающий или отключающий нагреватель с помощью полупроводниковых ключей. Микропроцессор ADAM соединен с компьютером, входящим в систему управления комплексом ВЭПП-4. Управляющий компьютер используется для контроля и загрузки микропроцессора ADAM, который после загрузки работает в автономном режиме.

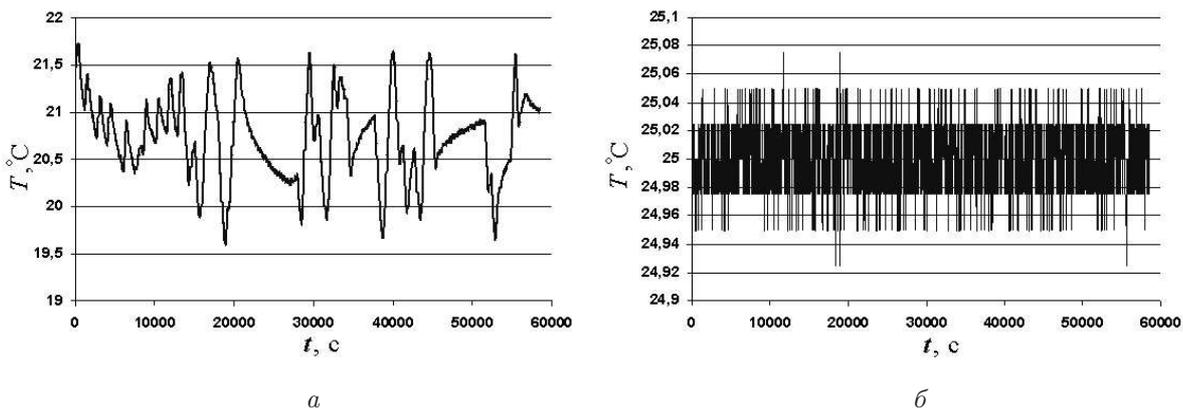


Рис. 11.4: Температура дистиллята резонаторов ВЭПП-4М с выключенной (*а*) и включенной (*б*) системой термостабилизации.

На рис. 11.4 показаны 16-часовые графики температуры дистиллята, охлаждающего резонаторы, с выключенной (*а*) и включенной (*б*) системой термостабилизации. Использование системы термостабилизации позволило снизить суточные колебания температуры с $2 - 5^\circ\text{C}$ до $0.1 - 0.2^\circ\text{C}$, и, как следствие, вероятность возникновения фазовых колебаний в режиме эксперимента снизилась примерно в 100 раз.

12 Исследования динамики пучка

Наряду с экспериментами по физике высоких энергий, ядерной физике и работами с использованием синхротронного излучения на комплексе ВЭПП-4 регулярно проводятся исследования физики пучков заряженных частиц в ускорителях. Целью таких работ, в конечном итоге, является улучшение параметров комплекса, повышение надежности работы и эффективности проведения экспериментов по основной программе. Некоторые исследования по динамике пучка кратко описаны ниже.

12.1 Эксперименты с поляризованными пучками

«Тонкое» сканирование частоты прецессии спина

В 2008 году была начата серия экспериментов по программе изучения возможных источников систематических ошибок в предполагаемом эксперименте по проверке СРТ теоремы на накопителе ВЭПП-4М. Эксперименты проводились в условиях, обеспечивающих более высокую эффективность, чем в предыдущие годы [25, 28].

В частности, были введены в эксплуатацию две новые системы регистрации тушековского поляриметра ВЭПП-4М, повышающие эффективность регистрации в десять раз. Суммарная скорость счета распределенной системы сцинтилляционных счетчиков возросла с 0.1 – 0.2 МГц до 1.5 – 2.0 МГц. Использование новой системы регистрации в два раза сокращает время на проведение калибровки энергии методом резонансной деполяризации. В этих экспериментах термостабилизация системы охлаждения магнитов ВЭПП-4М обеспечивалась с точностью до 0.1°C. В проведенных опытах по «сверхтонкому» сканированию по энергии со скоростью 2.5 ÷ 5 эВ/сек разрешение в определении частоты резонансной деполяризации, составляет несколько единиц 10⁻⁹. Ранее такой уровень точности, являющийся в настоящее время абсолютным рекордом, достигался нами лишь в единичных случаях.

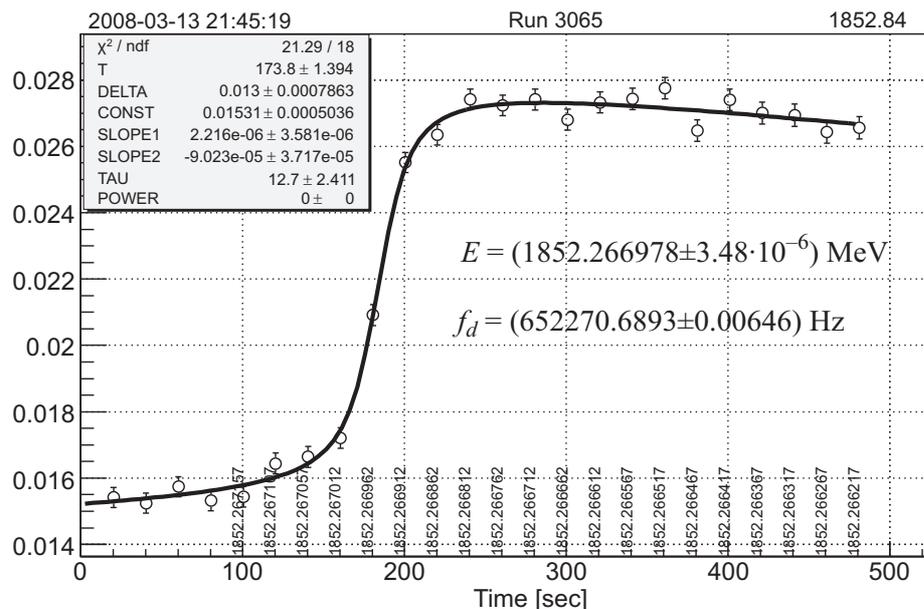


Рис. 12.1: «Тонкое» сканирование частоты прецессии спина.

Рис. 12.1 отображает процесс «тонкого» сканирования частоты деполяризатора со скоростью 2.5 эВ/сек (скорость дана в единицах энергетической шкалы, т.к. частота

прецессии спина частицы и ее энергия пропорциональны друг другу). Виден деполяризационный скачок, определяемый разницей в скорости счета тушековских частиц от двух электронных сгустков. Один из сгустков был вначале поляризован, другой — нет. Длительность (14 ± 3 сек) затянутого деполяризационного скачка зависит от собственной ширины и относительной скорости дрейфа линии спиновой частоты. Разрешение по частоте деполяризации, определяемое на шкале задаваемых значений частоты синтезатора, — около $1.5 \cdot 10^{-9}$.

Селективный деполяризатор, установленный на ВЭПП-4М, позволяет расширить возможности экспериментов с резонансной деполяризацией. С его помощью можно проводить выборочную деполяризацию одного из пары электронных или позитронных сгустков. Селективность раскачки пучка обеспечивается стробированием сигнала синтезатора. Строб запускается импульсом, привязанным к частоте обращения пучка, и раскачка включается на время пролета выбранного сгустка через кикер, сформированный полосковыми линиями. Для того чтобы минимизировать влияние импульса раскачки на другой пучок, импульс не содержит постоянной составляющей. Проведена прямая проверка работоспособности селективного деполяризатора: последовательная деполяризация двух поляризованных электронных сгустков.

Меллеровский поляриметр с внутренней поляризованной мишенью

Для «неразрушающего» контроля степени поляризации пучка в накопителе ВЭПП-3 был впервые разработан и применен в 2003 году новый метод, основанный на наблюдении асимметрии Меллеровского рассеяния релятивистских электронов на внутренней поляризованной мишени [57]. Идея измерения поляризации с использованием упругого рассеяния поляризованных электронов релятивистского пучка на поляризованных электронах пучка атомов водорода обсуждалась ранее в теоретических работах сотрудников ИЯФ. Экспериментально такая методика применительно к циркулирующему в ускорителе пучку на других установках не исследовалась.

В нашем случае внутренняя мишень представляет собой струю поляризованных атомов дейтерия из установки «Дейтрон» с плотностью $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (рис. 12.2). Струя пересекает релятивистский электронный пучок под прямым углом и имеет степень электронной поляризации, близкую к единице. Высокая степень поляризации струи, а также ее фокусировка обеспечиваются сепарацией атомов по направлению спина электрона системой секстипольных магнитов. Другая специальная магнитная система, не возмущающая заметным образом движение релятивистского пучка в ВЭПП-3, создает в области взаимодействия периодически меняющееся по знаку поле с амплитудой 300 гаусс, управляющее направлением поляризации мишени. Как поляризация пучка, так и поляризация мишени направлены по вертикали. Рассеяние изучается в вертикальной плоскости с помощью двух одинаковых счетчиков, расположенных выше и ниже медианной плоскости на расстоянии 1 м от мишени и состоящих из проволочной камеры, пластикового сцинтиллятора и вольфрамового радиатора между ними. Они регистрируют пару «электрон пучка-электрон струи» при условии корреляции по азимутальному углу и углу вылета из области взаимодействия. Тем самым реализована одна из оптимальных схем регистрации, отвечающая 90° рассеянию в системе центра масс. Практически, можно найти поляризацию пучка $\xi = |\vec{\xi}|$ по известной поляризации мишени $\xi_t = |\vec{\xi}_t|$, измеряя асимметрию

$$A \equiv \frac{N_{\uparrow\uparrow} - N_{\uparrow\downarrow}}{N_{\uparrow\uparrow} + N_{\uparrow\downarrow}} = A_g \xi \xi_t .$$

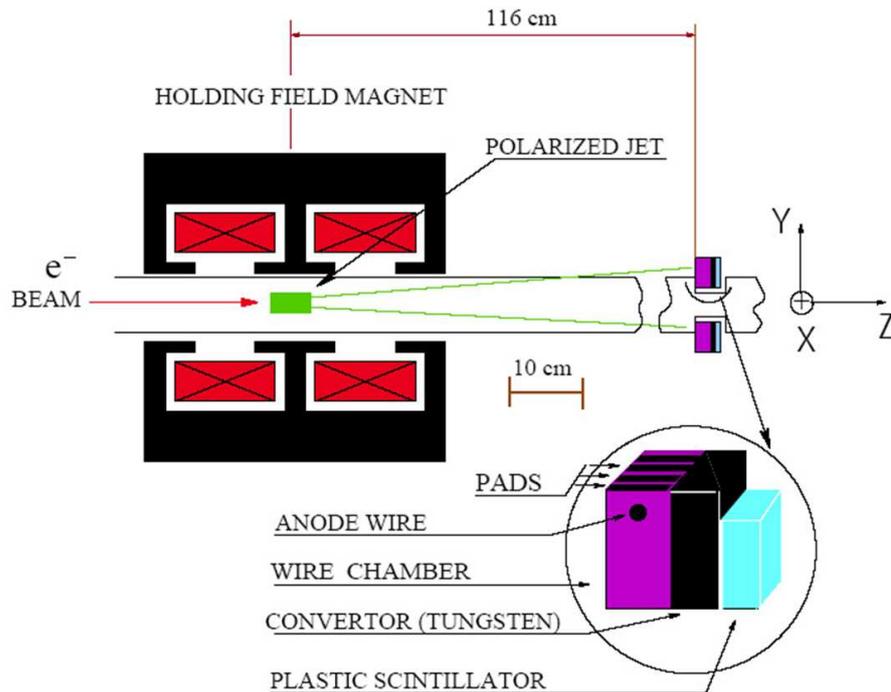


Рис. 12.2: Схема меллеровского поляриметра: anode wire – анодная проволока; holding field magnet – магнит для удержания поляризации атомов струи; polarized jet – поляризованная газовая струя; pads – полосковые подложки; wire chamber – проволочная камера; convertor – вольфрамовый конвертор; plastic scintillator – пластмассовый сцинтиллятор.

Здесь $N_{\uparrow\uparrow}$ и $N_{\uparrow\downarrow}$ – число актов рассеяния, зарегистрированных для двух ориентаций поляризации, обеспечиваемых переключением знака поляризации мишени; A_g – геометрический фактор, меньший теоретического максимума, равного $1/9$, из-за ненулевого углового акцептанса детектора.

Расчетная асимметрия в скорости счета при периодическом изменении знака поляризации мишени в 5 раз превышает статистическую ошибку для интервала времени наблюдения 8 минут при токе пучка 100 мА и степени его поляризации 80%. В эксперименте время набора необходимой статистики может увеличиваться в зависимости от величины фона, определяемого качеством вакуума в области взаимодействия. На рис. 12.3 представлены результаты эксперимента 2003 года по изучению поляризации на ВЭПП-3 с использованием Меллеровского поляриметра на внутренней мишени. По оси ординат отложена измеренная по наблюдаемой асимметрии равновесная степень поляризации частиц, установившейся под действием синхротронного излучения в ведущем поле; по оси абсцисс – энергия частиц. Ток пучка – до 100 мА; период смены знака поля, управляющего поляризацией мишени, равен 20 с; скорость счета полезных событий – 6 Гц.

Важным результатом явилось наблюдение заметного деполаризирующего влияния машинных комбинационных спиновых резонансов с частотами бетатронных колебаний (две стрелки справа на рис. 12.3) и целого спинового резонанса (стрелка слева). В эксперименте с быстрым понижением энергии ВЭПП-3 с уровня 1.85 ГэВ до 1.8 ГэВ изучено прохождение комбинационных спиновых резонансов. Полученные результаты послужили основой для уточнения сценария эксперимента на ВЭПП-4М по измерению массы τ -лептона. Разработанный метод является альтернативным другому «неразрушающему» методу – лазерному поляриметру, обладая тем преимуществом, что в мень-

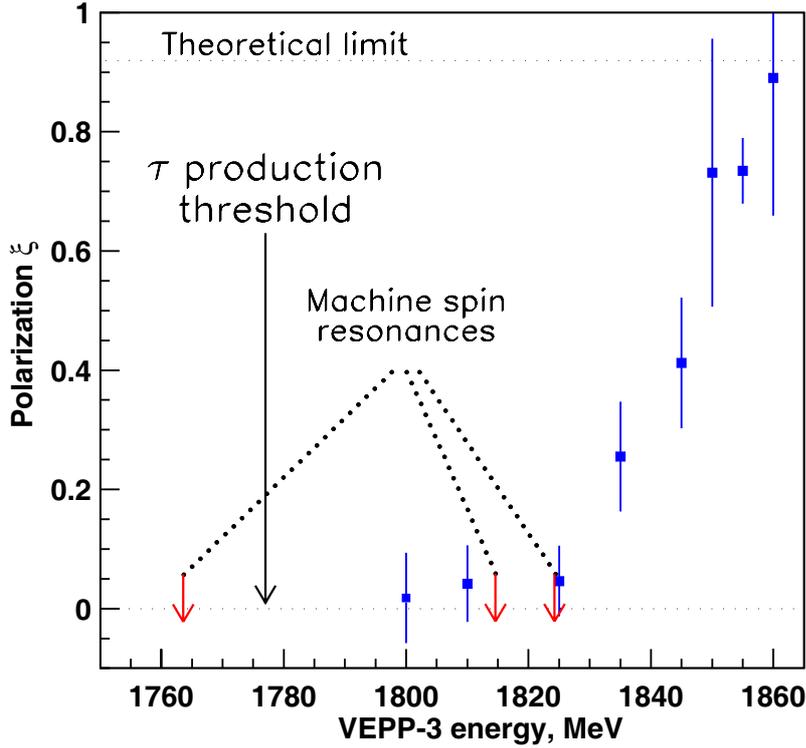


Рис. 12.3: Зависимость измеренной степени поляризации пучка ВЭПП-3 от энергии.

шей степени зависит от параметров релятивистского пучка. Он может быть применен с большей на порядок эффективностью, по сравнению с экспериментом на ВЭПП-3, на накопительных кольцах и коллайдерах, работающих в многосгустковом режиме с большим средним током пучка — порядка 1 А (накопители-затухатели для линейного супер-коллайдера, SuperV и С-τ фабрики). Отметим, что наибольший эффект асимметрии $\frac{7}{9}\vec{\xi}_t$ достигается в случае продольной поляризации обоих электронов [145].

12.2 Скорость счета тушековских электронов в зависимости от энергии

Для выяснения пределов применимости поляриметра с повышением энергии коллайдера ВЭПП-4М, измерена скорость счета тушековских электронов в зависимости от энергии пучка в диапазоне от 1.85 ГэВ до 4 ГэВ [25, 146]. Для измерений использовались сцинтилляционные счетчики тушековского поляриметра. Результаты представлены на рис. 12.4.

По результатам нескольких измерений (в 2008 и 2010 годах) энергетическая зависимость скорости \dot{N} регистрации совпадений в парах сопряженных счетчиков с вычетом некоррелированного фона, нормализованная на квадрат тока пучка I и умноженная на отношение текущего объема пучка к исходному (на энергии 1.85 ГэВ)

$$\frac{\dot{N}}{I^2} \frac{V(E)}{V(1.85 \text{ ГэВ})}$$

описывается степенной функцией $\propto E^n$ с показателем, близким к $n = -2$. Например, по данным эксперимента 2008 года он составляет -2.2 ± 0.2 . Теоретические расчеты [147] в релятивистском приближении с учетом двумерности внутрипучкового рассеяния, а также геометрического фактора счетчиков и расстояния от счетчиков до

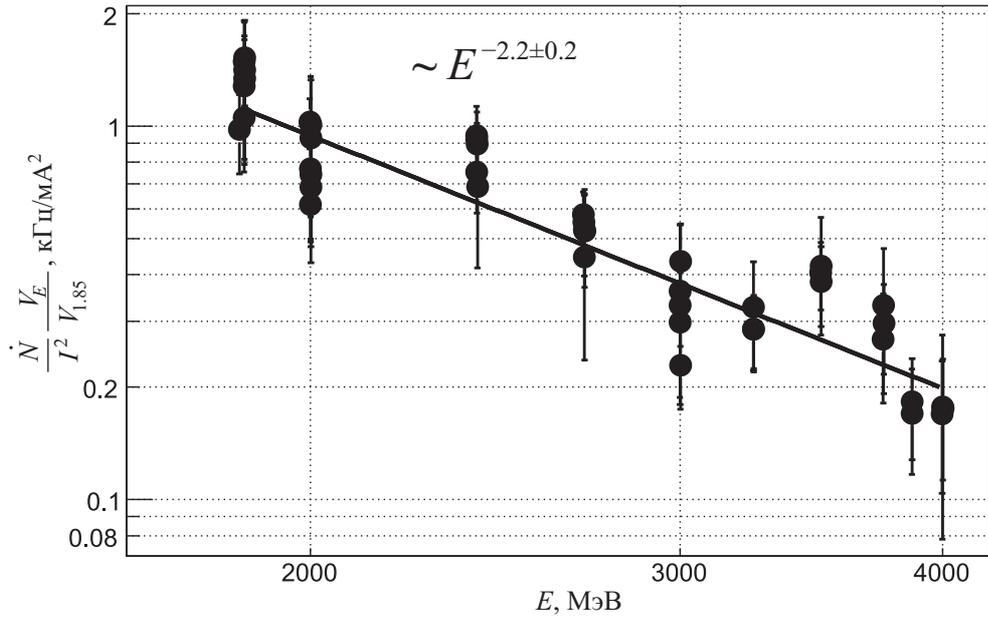


Рис. 12.4: Нормированная скорость счета «тушековских» электронов в зависимости от энергии пучка. Точки — эксперимент 2008 года, линия — аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией.

пучка дают зависимость указанной величины $\propto E^{-3.0}$ (в нерелятивистский расчете $\propto E^{-3.5}$).

Отличие может быть связано со следующими особенностями измерений. Они выполнены без учета влияния вакуумного фона, в основном, представленного электромагнитными ливнями от тормозных γ -квантов в процессах неупругого рассеяния частиц пучка на остаточном газе. Этот фон существенно зависит от настройки режима ВЭПП-4М. Относительный вклад ливневой компоненты растет вместе с энергией пучка. При фиксации длины сгустка, как в эксперименте 2008 г., с увеличением энергии вырастает размер ВЧ сепаратрисы, что увеличивает вклад многооборотных частиц в загрузке счетчиков, которым пренебрегается в расчете. На энергиях меньше 2.7 ГэВ в эксперименте (рис. 12.4) была включена магнитная змейка, увеличивающая разброс по импульсу и соответственно уменьшающая интенсивность внутрипучкового рассеяния на низкой энергии.

Вопрос о соотношении тушековских событий и вакуумного фона важен для определения возможности измерения деполяризационного скачка с повышением энергии ВЭПП-4М. Согласно расчетам [147] величина скачка заметно падает с ростом энергии (в асимптотике больших разбросов поперечных импульсов $\propto E^{-4}$). На энергии 3.85 ГэВ, в частности, скачок уменьшен до величины 0.28% при степени поляризации пучка 80%. С учетом вклада вакуумного фона наблюдаемый скачок может быть уменьшен вдвое и более. При достигнутом уровне показателей тушековского поляриметра проведение РД калибровок селективным деполяризатором при скачках около 0.1% еще возможно, но затруднено поиском оптимальных условий для достижения максимальной степени радиационной поляризации пучков (время радиационной поляризации на 3.85 ГэВ $\tau_{\text{pol}} \approx 1.8$ часа).

Отметим, что экспериментальная зависимость скорости регистрации рассеянных в пучке частиц от энергии пучка впервые получена в сравнительно большом диапазоне энергии на одной установке.

12.3 Методы измерения энергетического разброса пучка

Энергетический разброс является важным параметром пучка заряженных частиц в ускорителе. В экспериментах по прецизионному измерению масс частиц эта величина определяет энергетическое разрешение. С точки зрения детектора лучшим способом измерения энергетического разброса является сканирование по энергии узких резонансов, таких как $\psi(2s)$, однако, эта процедура требует существенных затрат времени и не может проводиться часто. Таким образом, задача измерения энергетического разброса ускорительными методами весьма актуальна. На установке ВЭПП-4М проведено экспериментальное сравнение различных методов измерения энергетического разброса пучка [148].

Энергетический разброс пучка может быть определен путем анализа края комптоновского спектра, используемого для калибровки энергии [29]. Статистическая ошибка такого метода при разумном времени набора статистики (порядка 1 часа) составляет 10 – 15%. Систематическая погрешность связана с неопределенностью формы энергетического отклика HPGe детектора при энергиях фотонов 4 – 6 МэВ и находится на уровне 5%.

В предположении пренебрежимо малого влияния коллективных эффектов продольный размер пучка σ_z пропорционален энергетическому разбросу σ_E/E :

$$\sigma_z = \frac{\alpha}{\omega_s} \frac{\sigma_E}{E}, \quad (12.20)$$

где α – коэффициент расширения орбит, $\omega_s = \nu_s \omega_0$ – циклическая частота синхротронных колебаний. В принципе энергетический разброс может быть определен по измерениям поперечного (обычно горизонтального) размера пучка σ_\perp в местах с большой дисперсией, где вклад энергетического разброса в размер является преобладающим. При выполнении условия

$$\left(\eta(s) \frac{\sigma_E}{E} \right)^2 \gg \varepsilon \beta(s),$$

где η – дисперсия и β – бета-функция на данном азимуте s , а ε – эмиттанс, можно приближенно оценить σ_E/E по простой формуле

$$\frac{\sigma_E}{E} \simeq \frac{\sigma_\perp}{\eta}, \quad (12.21)$$

однако точность измерений также может оказаться недостаточной.

Более изощренный метод основан на спектральном анализе хроматических синхробетатронных мод колебаний пучка. В спектре бетатронных колебаний пучка кроме основного пика есть сателлиты, кратные синхротронной частоте (при ненулевом хроматизме). Их относительная амплитуда определяется выражением [149]:

$$R_m(y) = \frac{1}{y^2} \int_0^\infty J_m^2(x) e^{-\frac{x^2}{2y^2}} x dx, \quad (12.22)$$

где $y = \left(\frac{\omega_\beta \alpha}{\omega_s} + \frac{\omega_0 \xi}{\omega_s} \right) \frac{\sigma_E}{E}$; J_m – функция Бесселя, m – номер синхробетатронной гармоники, $\omega_\beta = \nu_\beta \omega_0$ – циклическая частота бетатронных колебаний, $\xi = \frac{\Delta \nu_\beta}{\Delta p/p}$ – хроматизм.

Чтобы уменьшить влияние коллективных эффектов на динамику пучка, измерения необходимо проводить при малых токах пучка. На ВЭПП-4М использовался многоанодный ФЭУ, обеспечивающий измерения поперечного профиля пучка с однооборотным временным разрешением [150]. Чувствительность ФЭУ позволяет проводить измерения при токах пучка порядка 10 мкА, что дает возможность практически полностью избавиться от коллективных эффектов.

Колебания пучка возбуждались коротким импульсом электромагнитного поля в кикере, амплитуда удара подбиралась таким образом, чтобы размах колебаний пучка заметно превышал вертикальный размер сгустка. Спектр колебаний вычислялся путем дискретного преобразования Фурье измеренного массива координат пучка. Частоты и амплитуды синхробетатронных гармоник определялись с помощью уточнения ДПФ методом промежуточных гармоник [131]. Пример спектра приведен на рис. 12.5а, хорошо видны три пары синхробетатронных сателлитов.

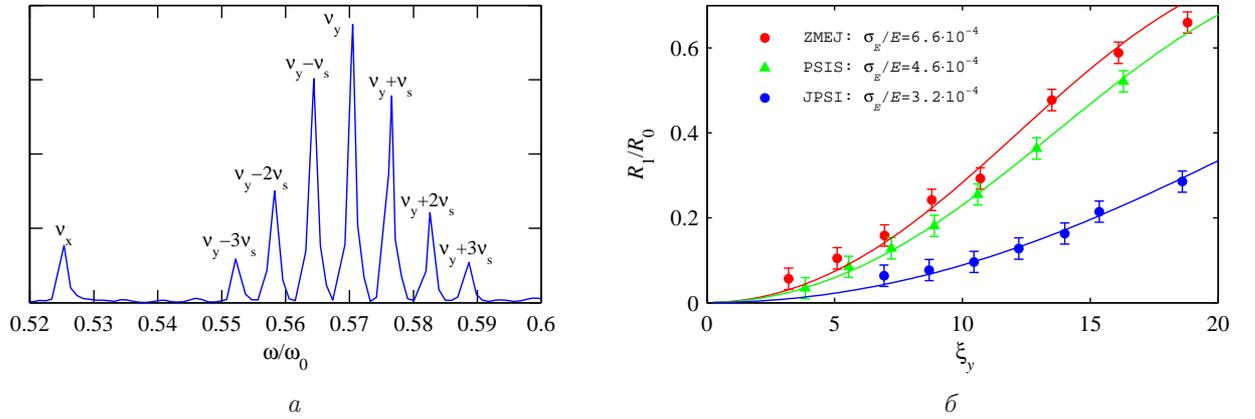


Рис. 12.5: Пример спектра синхробетатронных колебаний (а) и измеренная зависимость R_1/R_0 (б).

Измерения были проведены для ряда значений вертикального хроматизма в диапазоне $\xi_y = 5 \div 20$. Измеренная зависимость $R_1/R_0(\xi_y)$ амплитуды первого синхробетатронного сателлита, нормированной на амплитуду бетатронного пика, показана на рис. 12.5б для трех режимов работы ВЭПП-4М, различающихся значениями энергии и энергетического разброса. На графиках приведены экспериментальные точки с соответствующей погрешностью измерения и теоретические кривые. Аппроксимация измеренных данных дает величину энергетического разброса.

Еще один метод, примененный на ВЭПП-4М, основан на анализе огибающей бетатронных колебаний. Как было показано в [151], огибающая $A(t)$ свободных бетатронных колебаний, возбужденных коротким ударом с амплитудой δa , много большей, чем поперечный размер пучка σ_{\perp} , имеет вид:

$$A(t) \propto \exp\left[-\frac{t^2}{2\tau^2}\right] \exp\left[-\left(\frac{\partial\omega_{\beta}}{\partial E} \frac{\sigma_E}{\omega_s}\right)^2 (1 - \cos\omega_s t)\right], \quad (12.23)$$

где

$$\tau^{-1} = 2 \frac{\partial\omega_{\beta}}{\partial a^2} \delta a \sigma_{\perp}.$$

При ненулевом хроматизме огибающая модулирована по амплитуде с частотой синхротронных колебаний, глубина модуляции зависит от хроматизма и энергетического разброса.

Энергетический разброс может быть определен как параметр аппроксимации измеренной огибающей бетатронных колебаний расчетной функцией (12.23). Однако, форма огибающей отклоняется от (12.23) из-за быстрого затухания, обусловленного взаимодействием пучка с поперечным импедансом вакуумной камеры. Декремент быстрого затухания пропорционален току пучка. Проблема может быть решена двумя способами: измерением декремента и включением затухания в функцию аппроксимации, или проведением измерений огибающей с пучком малой интенсивности, когда затуханием можно пренебречь. В экспериментах на ВЭПП-4М измерения проводились с помощью многоанодного ФЭУ, имеющего достаточное пространственное разрешение при токе пучка 10 – 30 мкА.

Для повышения точности применен дискретный гребенчатый фильтр [130]. Пример измерения приведен на рис. 12.6а, верхний график отображает исходные данные, колебания, показанные на нижнем графике, синтезированы из набора гармоник $\nu_\beta \pm m\nu_s$, где ν_β – бетатронная и ν_s – синхротронная частоты, $m = 0, 1, 2, 3$. Частоты и амплитуды гармоник вычислялись с высокой точностью с помощью ДПФ с уточнением. На нижнем графике также приведена огибающая (12.23) колебаний.

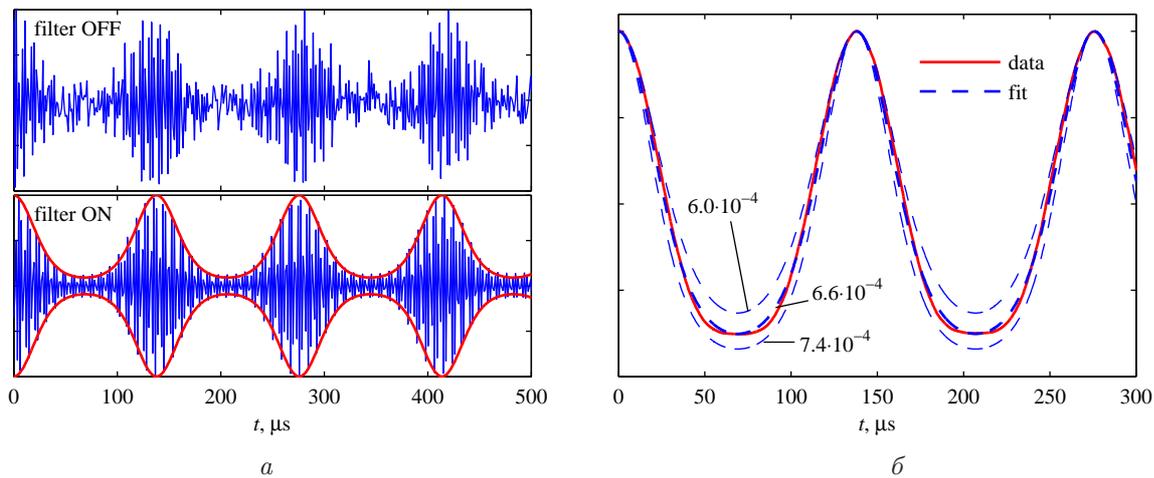


Рис. 12.6: Измеренные бетатронные колебания (а) и аппроксимация огибающей (б).

Пример аппроксимации измеренной огибающей бетатронных колебаний расчетной функцией (12.23) приведен на рис. 12.6б. Сплошной линией показана измеренная огибающая, пунктирными — аппроксимирующая функция (12.23) с тремя близкими значениями энергетического разброса как параметра аппроксимации. Можно полагать, что оптимальная аппроксимация позволяет определить энергетический разброс с точностью не хуже 5 %.

12.4 Измерение динамической апертуры

Динамическая апертура ВЭПП-4М определялась несколькими методами. Наиболее распространенный из них основан на измерении когерентных колебаний пучка, возбужденных коротким импульсом электромагнитного поля. Ток и поперечное положение пучка измеряются на каждом обороте с помощью электростатического датчика положения пучка.

При малых амплитудах колебаний потерь интенсивности пучка нет, так как все частицы движутся внутри области устойчивости. При увеличении силы удара воз-

никают потери частиц оказавшихся за пределами динамической или геометрической апертуры. Наличие и горизонтального, и вертикального кикеров позволяет измерять апертуру для обеих координат, как это показано на рис. 12.7.

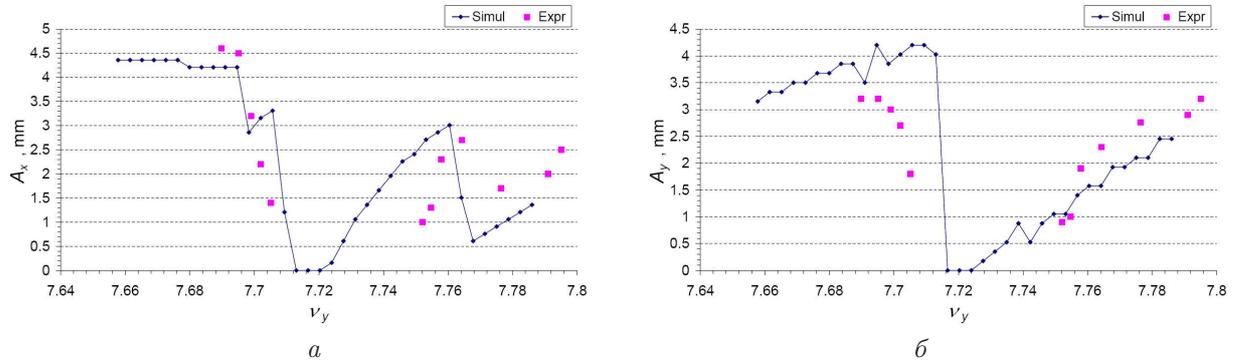


Рис. 12.7: Горизонтальная (а) и вертикальная (б) апертура ВЭПП-4М при пересечении суммового резонанса $\nu_x + 2\nu_y = 24$.

Другой метод основан на измерении зависимости времени жизни пучка от величины искусственно ограниченной геометрической апертуры. Пока геометрическая апертура больше, чем динамическая, время жизни пучка не меняется, как только величина геометрической апертуры сравнивается с динамической, наблюдается уменьшение времени жизни, как это показано на рис. 12.8 [152]. Измерения динамической апертуры проводились при токе пучка не более 1 мА, чтобы уменьшить влияние коллективных эффектов. Зависимость времени жизни от тока пучка также учитывалась.

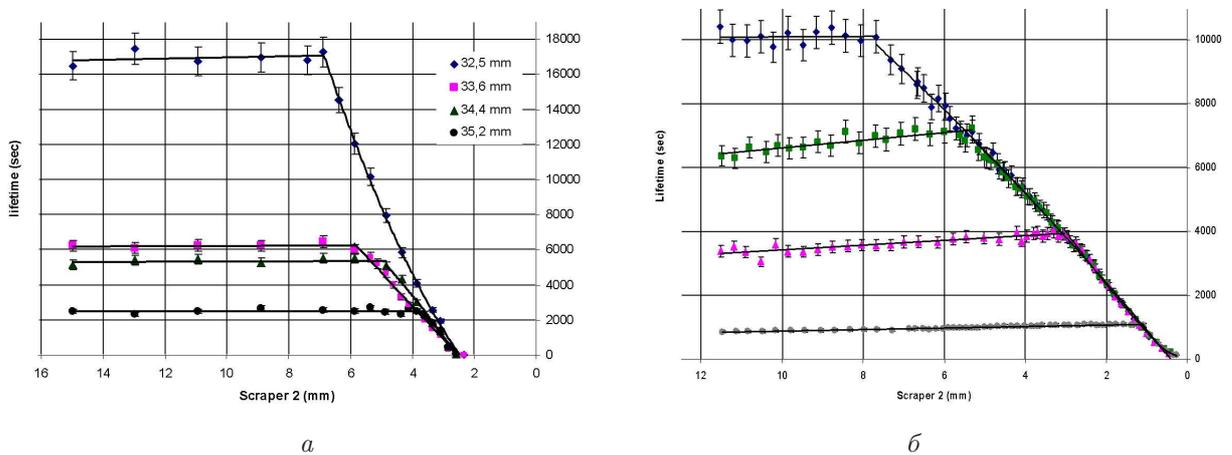


Рис. 12.8: Изменение времени жизни пучка от глубины введения пробника.

Ограничение горизонтальной и вертикальной геометрической апертуры осуществлялось с помощью дистанционно управляемых металлических пробников, вводимых в вакуумную камеру. Время жизни определялось с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-4}$ по интенсивности синхротронного излучения (СИ), измеряемого с помощью фотодиода НАМАМАТСУ S2387-33R, сигнал которого оцифровывался 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем.

Описываемый метод позволяет измерить апертуру и время жизни в режиме встречных пучков. Как известно, эффекты встречи приводят к формированию длинных хвостов распределения пучков в поперечном направлении и даже к увеличению поперечных размеров (при токах близких к пороговым). Экспериментально исследовался

случай «сильного» позитронного пучка, ток которого был близок к порогу по эффектам встречи. На рис. 12.9 показано измеренное уменьшение времени жизни электронного пучка в процессе ограничения вертикальной апертуры пробниками в обоих режимах работы — с эффектами встречи (кружки) и без них (ромбы).

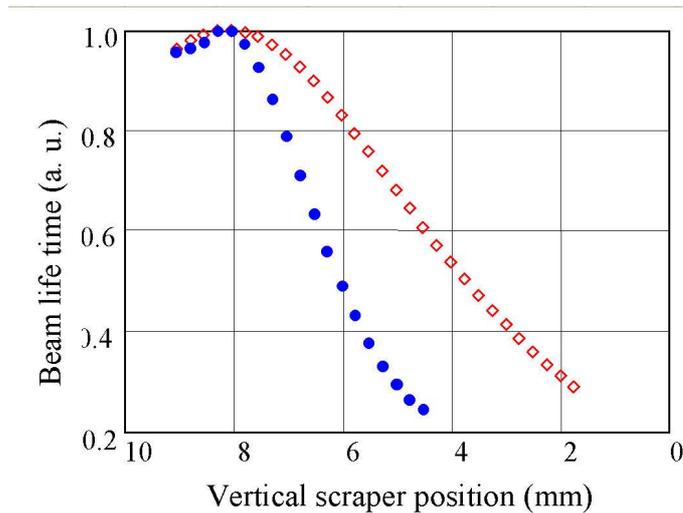


Рис. 12.9: Измеренное время жизни пучка в зависимости от позиции скрепера в режиме встречных пучков (синие кружки) и с одиночным пучком (красные ромбы).

Как видно, зависимость времени жизни от положения пробника значительно сильнее в режиме встречных пучков, что указывает на увеличение скорости потерь частиц. Однако апертура (точка перегиба кривой — изменение характера зависимости времени жизни) не изменилась. Следовательно, потери электронов вызваны их диффузией из-за перекрытия стохастических областей резонансов, появляющихся из-за эффектов встречи.

12.5 Исследование динамики пучка при пересечении бетатронного резонанса

Наличие на комплексе ВЭПП-4М уникального прибора [138], дающего возможность регистрировать поперечный профиль пучка в 16 точках в течение 2^{17} оборотов, позволило провести интересные эксперименты по пересечению бетатронного резонанса [25].

Вертикальный резонанс третьего порядка $3\nu_y = 23$ пересекался электронным пучком с различной скоростью путем изменения силы квадрупольных линз. В процессе эксперимента можно было менять мощность резонанса с помощью повернутого (skew) секступольного магнита и нелинейный сдвиг бетатронных частот октупольными линзами. При этом измерялся ряд параметров, таких как скорость потерь частиц, размер пучка, поперечное распределение, фазовые траектории, амплитудно-зависимый сдвиг частот, и т.д. Все измерения были сделаны при малом токе электронного пучка — около 0.5 мА, чтобы избежать когерентных эффектов.

Для исследования фазовых траекторий когерентные бетатронные колебания возбуждались с помощью быстрого импульсного кикера и измерялись электростатическим датчиком положения пучка в пооборотном режиме с пространственным разрешением около 50 мкм. Потеря частиц и хвосты распределения пучка наблюдались

сцинтилляционными счетчиками, вставленными в вакуумную камеру, которые могут перемещаться с точностью не хуже чем 0.1 мм. ПЗС-камеры использовались для измерения поперечных размеров и положения пучка. Параметры ускорителя были настроены таким образом, чтобы наблюдать резонанс третьего порядка $3\nu_y = 23$ в фазовом пространстве бетатронных колебаний. На рис. 12.10 приведены фазовые траектории, построенные методом, описанным в [130, 153], используя данные, измеренные пооборотным датчиком положения пучка.

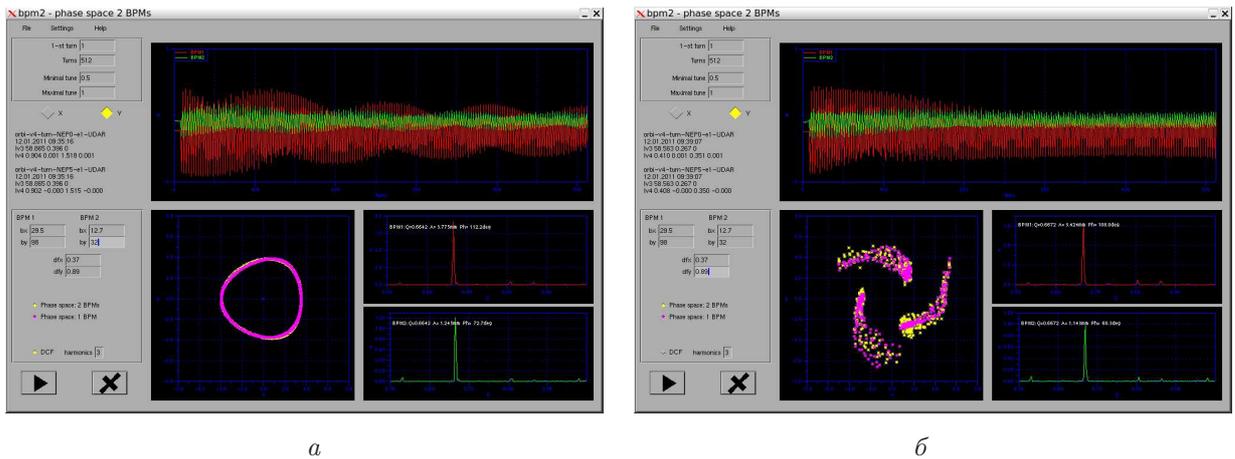


Рис. 12.10: Фазовые траектории вблизи резонанса третьего порядка: $\nu_y = 0.6642$ (а) и $\nu_y = 0.6672$ (б).

Результаты эксперимента показывают, что при большой скорости пересечения резонанса и малой нелинейности не наблюдается ни изменения поперечного распределения пучка, ни потери частиц. Замедляя скорость пересечения резонанса при нелинейности, близкой к нулю, были зафиксированы потери пучка при неизменном поперечном распределении. Это означает, что при малом значении нелинейности резонанс не имеет островков устойчивости. Но поскольку сила резонанса мала, область неустойчивости очень узка, и потери частиц возникают только при низкой скорости пересечения резонанса.

В согласии с теорией, при определенных значениях зависимости частоты бетатронных колебаний от амплитуды, силы резонанса и (малой) скорости пересечения наблюдалось образование областей бетатронной автофазировки и захват частиц в эти островки устойчивости. На рис. 12.11 приведены пооборотные измерения вертикального профиля пучка, демонстрирующие момент резонансного создания островка устойчивости и его дальнейшей эволюции, а также вертикальное распределение пучка, соответствующее различным моментам времени (линии сечений 1 – 6).

Следует отметить, что при изменении направления пересечения резонанса вместо захвата частиц в островок устойчивости было замечено небольшое раздувание размера пучка. Такой «гистерезис» нелинейного резонанса известен и уже был ранее теоретически изучен.

Потери частиц при пересечении резонанса измерялись с помощью датчика синхротронного излучения и с помощью сцинтилляционного счетчика, вдвинутого по вертикали в вакуумную камеру. Характерная картина потерь при пересечении неустойчивого резонанса третьего порядка приведена на рис. 12.12. Потери частиц, измеренные датчиком синхротронного излучения, показаны на верхнем графике, измеренные сцинтилляционным счетчиком — на нижнем. Бетатронная частота изменялась в пре-

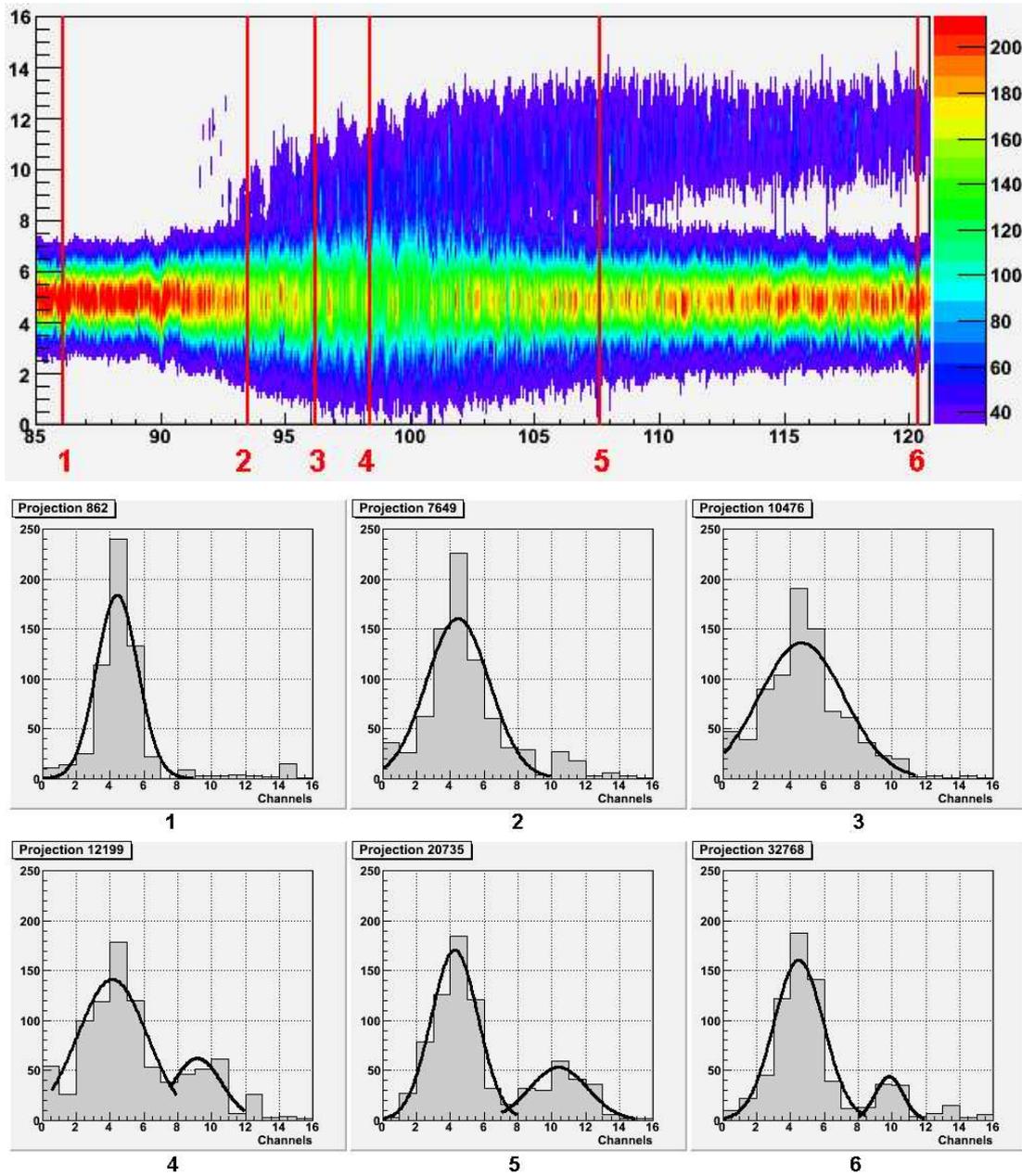


Рис. 12.11: Захват частиц в островки устойчивости. Сплошными кривыми на гистограммах показана аппроксимация распределения плотности пучка функцией Гаусса.

делах $0.6687 \rightarrow 0.6653$ за 1 секунду. Изрезанная структура графика потери частиц связана, по-видимому, с нестабильностью (хотя и малой, порядка 10^{-4}) источников питания квадрупольных магнитов.

Теория, развитая в [154], позволяет построить график потерь частиц при пересечении резонанса и, в частности, предсказывает, что в зависимости от направления пересечения один из краев графика потерь должен иметь более резкий спад. И действительно, такое поведение наблюдалось экспериментально. На рис. 12.13 приведены графики измеренных и рассчитанных потерь частиц при пересечении неустойчивого резонанса третьего порядка. Рис. 12.13а соответствует пересечению резонанса снизу вверх $\Delta\nu_y = 0.6653 \rightarrow 0.6685$, рис. 12.13б — сверху вниз $\Delta\nu_y = 0.6687 \rightarrow 0.6653$.

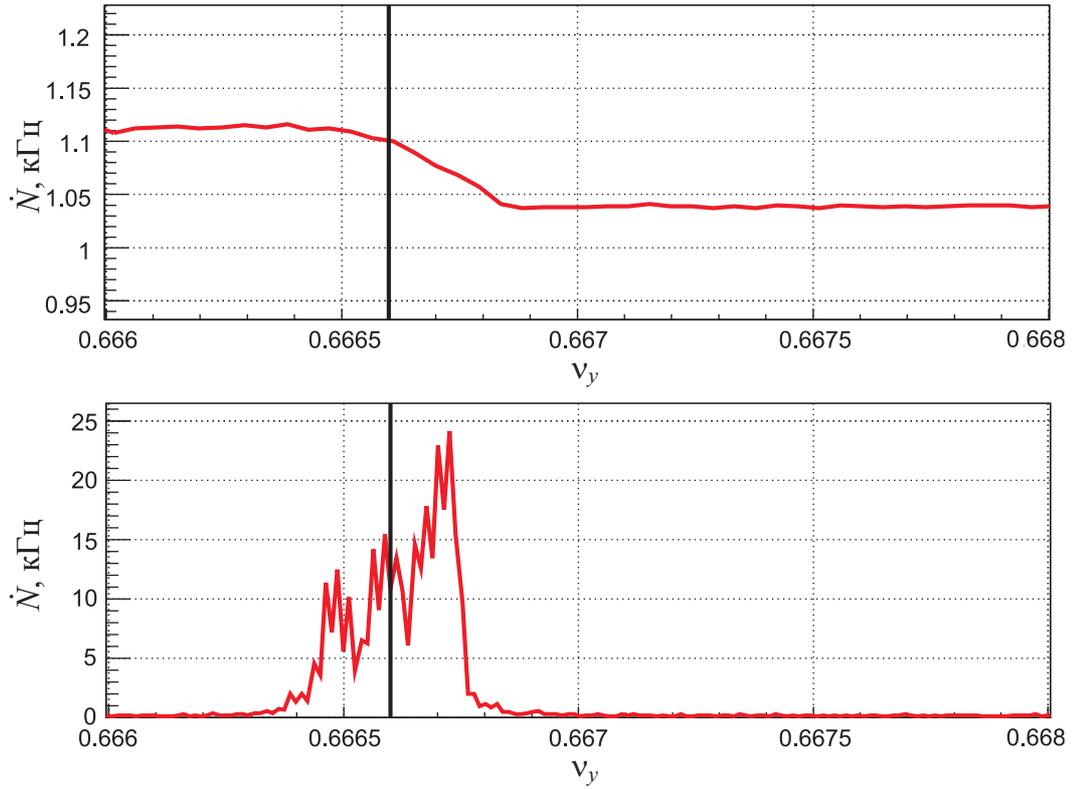


Рис. 12.12: Потери частиц, измеренные датчиком СИ (вверху) и сцинтилляционным счетчиком (внизу).

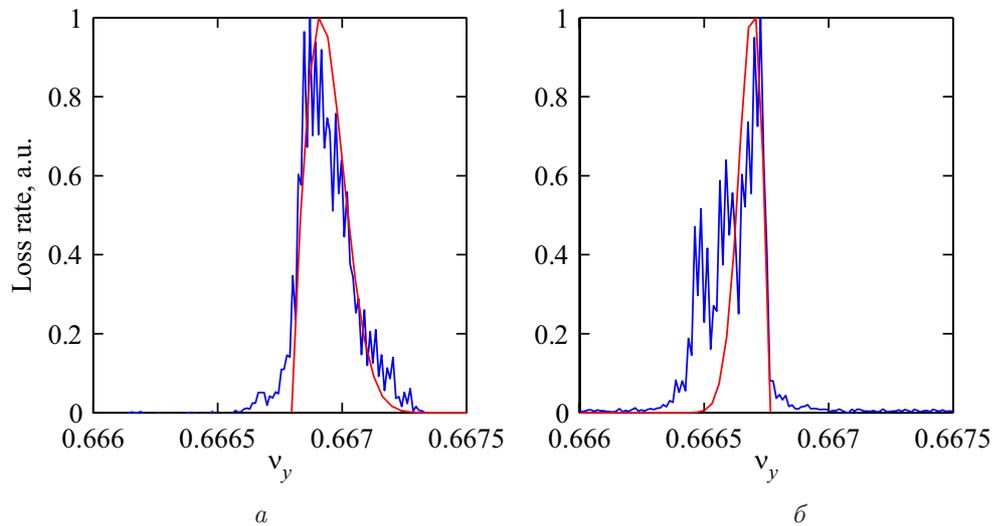


Рис. 12.13: Измеренные и рассчитанные потери частиц при пересечении резонанса с увеличением (а) и уменьшением (б) частоты бетатронных колебаний.

12.6 Измерение импедансов связи

Широкополосный импеданс ВЭПП-4М в основном сформирован неоднородностями вакуумной камеры, к которым относятся вертикальные и горизонтальные устройства разведения электронного и позитронного пучков, а также резонансные полости и скачкообразные изменения поперечного сечения камеры. Если вакуумная камера

ускорителя имеет большое число неоднородностей, то вычисление импедансов является весьма сложной и трудоемкой задачей. Однако благодаря тому, что действительная (резистивная) и мнимая (реактивная) части импеданса проявляются в различных физических эффектах, импедансы связи могут исследоваться экспериментально путем анализа движения пучка [27, 155].

Продольный импеданс

Резистивная часть продольного импеданса приводит к когерентным потерям энергии, квадратично зависящим от заряда пучка q :

$$\Delta E = -k_{\parallel} q^2 . \quad (12.24)$$

Коэффициент пропорциональности k_{\parallel} называют продольным фактором когерентных потерь (longitudinal loss factor). Он зависит как от свойств вакуумной камеры, характеризующих суммарным широкополосным продольным импедансом wake-функцией $Z_{\parallel}(\omega)$, так и от продольного распределения плотности пучка λ :

$$k_{\parallel} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \Re Z_{\parallel}(\omega) |\lambda(\omega)|^2 d\omega, \quad (12.25)$$

где $\lambda(\omega)$ – Фурье-образ распределения плотности пучка $\lambda(t)$. Так же, как и потери на синхротронное излучение, когерентные потери энергии компенсируются в ускоряющих резонаторах на каждом обороте пучка. Фактор когерентных потерь может быть определен по измерениям зависимости равновесной фазы φ_{rf} ускоряющего напряжения от среднего тока пучка $I_b = qf_0$:

$$k_{\parallel} = f_0 V_{\text{rf}} \cos \varphi_{\text{rf}} \frac{\Delta \varphi_{\text{rf}}}{\Delta I_b}. \quad (12.26)$$

где V_{rf} – амплитуда ускоряющего напряжения, f_0 – частота обращения.

На рис. 12.14а приведен график измеренной зависимости фактора когерентных потерь k_{\parallel} ВЭПП-4М от длины сгустка σ_z , определяющей ширину спектрального распределения $\lambda(\omega)$ в пространстве частот.

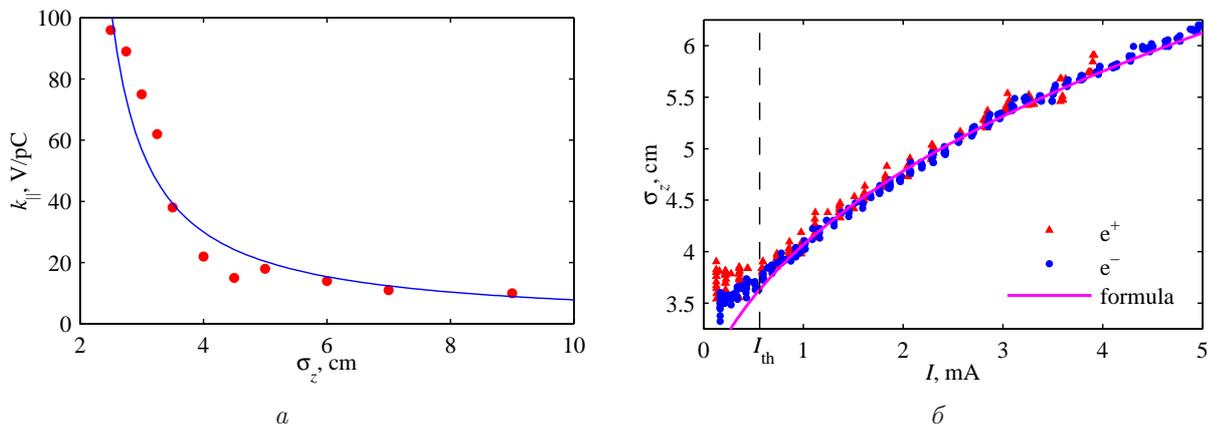


Рис. 12.14: Фактор когерентных потерь (а) и удлинение сгустка (б) ВЭПП-4М.

Нормализованный продольный импеданс Z_{\parallel}/n может быть оценен по измеренной зависимости длины сгустка σ_z от тока I_b . Для релятивистского электронного или позитронного пучка с гауссовым распределением линейной плотности удлинение сгустка в зависимости от тока с учетом искажения потенциальной ямы и микроволновой неустойчивости описывается кубическим уравнением [156]:

$$\left(\frac{\sigma_z}{R}\right)^3 = \frac{\alpha I_b}{\sqrt{2\pi} (E/e) \nu_s^2} \left[\left| \frac{Z_{\parallel}(\omega_b)}{n} \right| + \left(\frac{Z_{\parallel}}{n}\right)_{\text{eff}} \right], \quad (12.27)$$

где R — средний радиус ускорителя, α — коэффициент расширения орбит, ν_s — синхротронная частота (в единицах частоты обращения), $\omega_b \simeq c/\sigma_z$ — верхняя граница спектра пучка. Эффективный импеданс $(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}$ является взвешенным импедансом, усредненным по спектру частот пучка. Следует отметить, что формула (12.27) неприменима в случае очень коротких сгустков ($\sigma_z \ll b$, b — поперечный размер вакуумной камеры), когда вклад высокочастотных составляющих импеданса становится преобладающим. На рис. 12.14б приведен пример измерений длины электронного и позитронного пучков ВЭПП-4М в зависимости от тока. Видно, что выше порога микроволновой неустойчивости $I_{\text{th}} \approx 0.6$ мА измеренные данные с хорошей точностью аппроксимируются расчетной зависимостью длины сгустка от тока, описываемой уравнением (12.27). Величина нормализованного продольного импеданса $|Z_{\parallel}/n|$, вычисленная по измеренным данным, составляет около 6 Ом.

Поперечный импеданс

В результате взаимодействия пучка с резистивным поперечным импедансом $\Re Z_{\perp}$ возникает хроматический head-tail-эффект, характеризуемый head-tail-фазой [96]

$$\chi = \frac{\xi \sigma_z}{\alpha R}, \quad (12.28)$$

где $\xi = \frac{\Delta \nu_{\beta}}{\Delta p/p}$ — хроматизм, σ_z — продольный размер пучка, α — коэффициент расширения орбит, R — средний радиус ускорителя.

Если величина χ много меньше единицы, то инкремент/декремент бетатронных колебаний может быть оценен по приближенной формуле, полученной в рамках двухчастичной модели:

$$\tau_{\pm}^{-1} = \mp I_b \frac{c \xi}{2\pi (E/e) \alpha \nu_{\beta}} Z_{\perp}(0), \quad (12.29)$$

где I_b — ток пучка, ν_{β} — бетатронная частота, $Z_{\perp}(0)$ — величина широкополосного поперечного импеданса $Z_{\perp}(\omega)$ на нулевой частоте. Когерентные колебания (центр масс сгустка) характеризуются τ_+ , некогерентные (размер) — τ_- . Когерентная мода затухает, если $\xi/\alpha > 0$, и становится неустойчивой, если $\xi/\alpha < 0$, в то время как некогерентная мода — наоборот.

Таким образом, когда хроматизм положителен, резистивный поперечный импеданс может быть определен с помощью формулы (12.29) по измеренным значениям времени быстрого затухания когерентных бетатронных колебаний, возбуждаемых ударом кикера. На рис. 12.15а приведен пример измерений декрементов быстрого затухания горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний электронного пучка ВЭПП-4М

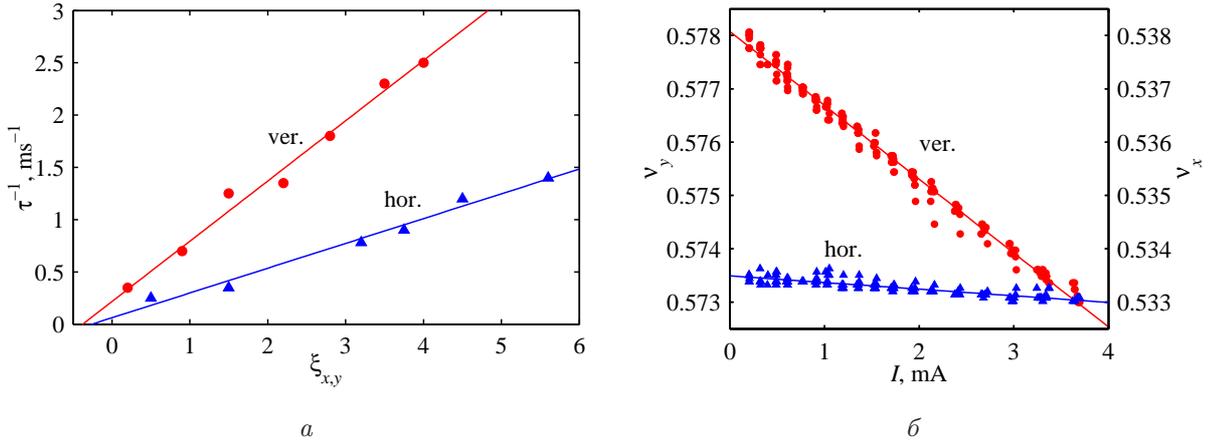


Рис. 12.15: Измеренные значения времен быстрого затухания (а) и когерентный сдвиг бетатронной частоты (б) ВЭПП-4М.

в зависимости от хроматизма, ток пучка около 7 мА, энергия 1.8 ГэВ. По результатам измерений величина резистивного поперечного импеданса ВЭПП-4М составляет $\Re Z_{\perp} \simeq 3.5 \text{ МОм/м}$.

При нулевом хроматизме декремент определяется взаимодействием пучка с полосковыми линиями, для N пар согласованных линий

$$\tau^{-1} = -I_p \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i L_i}{d_i} \frac{f_0}{E/e}, \quad (12.30)$$

где $I_p = \frac{\sqrt{2\pi} R}{\sigma_z} I_b$ – амплитудное значение тока пучка, L_i и ρ_i – соответственно длина и волновое сопротивление каждой пластины в i -й паре, d_i – зазор между пластинами.

Реактивная часть поперечного импеданса $\Im Z_{\perp}$ приводит к когерентному сдвигу бетатронной частоты в зависимости от тока сгустка [96]:

$$\Delta\nu_{\beta} = -\frac{I_p}{8\pi(E/e)} \sum_k \beta_k \Im Z_{\perp k}, \quad (12.31)$$

где β_k – бета-функция на участке камеры с импедансом $Z_{\perp k}$. На рис. 12.15б представлены результаты измерений когерентного сдвига вертикальной бетатронной частоты ВЭПП-4М. Поскольку во время измерений ток пучка был значительно ниже порога неустойчивости поперечных связанных мод, измеренные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью (12.31). Измеренная величина когерентного сдвига составляет $\Delta\nu_y/\Delta I_b = -1.38 \text{ А}^{-1}$, что соответствует среднему взвешенному по бета-функции значению импеданса $\langle \Im Z_{\perp} \beta \rangle \simeq 22 \text{ МОм}$.

Азимутальное распределение импеданса

Для измерения азимутального распределения импеданса на ускорительном комплексе ВЭПП-4 был разработан новый метод, базирующийся на измерении искажения равновесной орбиты пучка локальным поперечным импедансом [157, 158]. Поскольку шумовая погрешность датчиков положения пучка пропорциональна квадратному корню из полосы частот, этот метод дает лучшее разрешение по сравнению с методом [159], основанным на измерении набеге бетатронной фазы, так как датчики

положения пучка используются в узкополосном режиме (измерение орбиты), а не в широкополосном (пооборотные измерения колебаний).

Если на азимуте z_0 пучок смещен от равновесной орбиты, взаимодействие с локальным поперечным импедансом $\Im Z_{\perp}$ дает приращение поперечного импульса, пропорциональное смещению $y(z_0)$ и току пучка I_p . Локальное изменение поперечного импульса пучка приводит к возмущению орбиты $\Delta y(z)$, имеющему вид бетатронной волны:

$$\Delta y(z) = \frac{I_p}{E/e} \Im Z_{\perp} y(z_0) \frac{\sqrt{\beta(z_0)\beta(z)}}{2 \sin \pi \nu_{\beta}} \cos(|\phi(z) - \phi(z_0)| - \pi \nu_{\beta}). \quad (12.32)$$

Таким образом, если на предполагаемом участке локализации импеданса создать П-образное искажение орбиты (бамп) и сравнить орбиту, измеренную при малом токе пучка (импеданс «выключен») с орбитой, измеренной при большом токе (импеданс «включен»), то разность этих орбит будет представлять собой бетатронную волну (12.32), распространяющуюся от места локализации импеданса.

Как оказалось в экспериментах на ВЭПП-4М, система измерения орбиты имеет систематическую погрешность, зависящую от тока пучка. Чтобы минимизировать эту погрешность, для определения локального импеданса использовалась следующая комбинация четырех орбит:

$$\Delta y(z) = [y_2(z) - y_1(z)] - [y_{02}(z) - y_{01}(z)], \quad (12.33)$$

где орбиты y_{01} и y_{02} измерены соответственно с большим и малым током, но без бампа, а орбиты y_1 и y_2 измерены с теми же значениями большого и малого тока, а также с бампом в месте локализации импеданса.

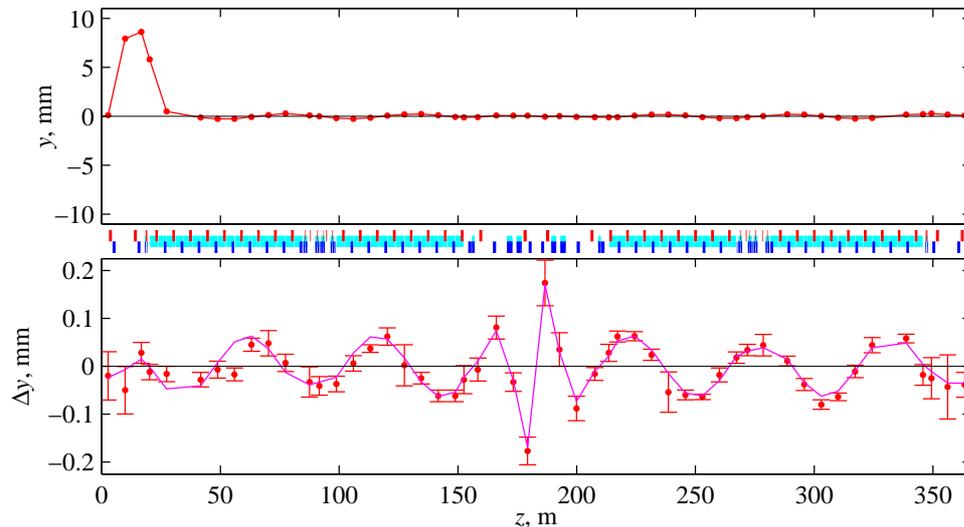


Рис. 12.16: Измерение локального импеданса.

В качестве примера рассмотрим измерение локального импеданса участка в техническом промежутке ВЭПП-4М, включающего в себя 3 из 5 ускоряющих резонаторов, 3 пары пластин электростатического разведения пучков и 5 резких изменений вертикального сечения камеры. На рис. 12.16 вверху показан вертикальный бамп, созданный на этом участке, а внизу – измеренные значения вертикальной комбинации орбит (12.33) в сравнении с расчетной бетатронной волной (12.32) (сплошная линия).

Разность амплитудных значений тока пучка составляла $\Delta I_p = 25$ А. Как видно, измеренная разность вертикальных орбит согласуется с расчетной кривой (12.32) в пределах статистической погрешности измерения. По результатам измерений, импеданс этого участка составляет около 10 % от суммарного импеданса ВЭПП-4М.

Описанный метод был успешно применен для измерения азимутального распределения импеданса электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М. На рис. 12.17 приведено измеренное распределение удельного взвешенного импеданса $\frac{\Delta \langle \mathcal{Z}_\perp \beta \rangle}{\Delta z}$.

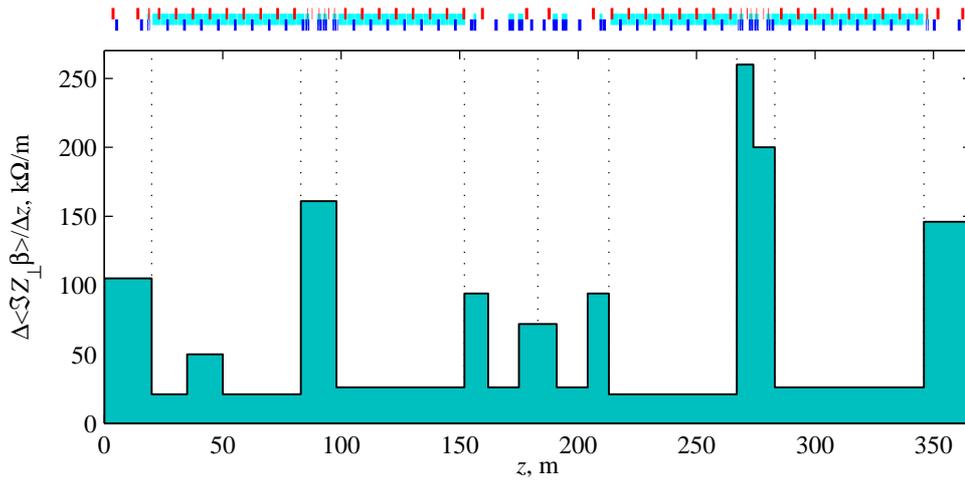


Рис. 12.17: Измеренное распределение импеданса ВЭПП-4М.

Метод измерения локального импеданса по искажению орбиты пучка достаточно универсален, обеспечивая в принципе измерение двумерной топологии электромагнитного поля, наведенного пучком в окружающей структуре. Точность метода может быть сделана достаточно высокой, она определяется шумовым разрешением системы диагностики и возможностью создания короткого локального искажения орбиты. Измеренные данные могут быть использованы для исследования гармонического состава поперечного импеданса. Частотная зависимость импеданса связи также может быть измерена путем варьирования длины сгустка.

Заключение

В 2000–2010 гг. электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М проработал с циркулирующими электронными и (или) позитронными пучками в общей сложности более 2000 суток. Из них в режиме встречных пучков по программе физики элементарных частиц с детектором КЕДР — около 700 суток. Около 1000 суток было использовано на эксперименты с синхротронным излучением (в основном на накопителе ВЭПП-3). Эффективная работа ускорительного комплекса и проведение уникальных исследований были бы невозможны без постоянного совершенствования систем коллайдера, проведения экспериментов по динамике заряженных частиц, создания новых средств диагностики пучка, оптимизации параметров установок комплекса и т.д. Поскольку эта деятельность представляет самостоятельный интерес для сообщества разработчиков и создателей ускорительных комплексов, в предлагаемой статье мы сделали попытку отразить наш опыт за прошедшее десятилетие. Авторы благодарят инженеров, лаборантов, оперативных дежурных лаб. 1-3 ИЯФ СО РАН, в чьем ведомстве находится электрон-позитронный комплекс ВЭПП-4: А.Н. Апанасенко, М.М. Бровина, В.П. Быкова, С.Д. Гурова, А.М. Долгова, В.И. Евсеенко, А.А. Жиркову, Л.Г. Жмака, А.М. Колесникова, Н.И. Кондратьева, П.А. Кошкина, Г.М. Курганова, И.Е. Лубягина, И.К. Мишина, Н.И. Осокину, А.П. Петрова, А.Я. Порошина, А.С. Рудакова, С.С. Рудакова, П.В. Свищева, Л.Е. Сердакова, А.Н. Сошилова, Л.Д. Стебайло, Н.Н. Тура, Л.А. Цуканову, А.П. Чабанова, П.Б. Чеблакова, В.О. Швайбовича.

Кроме того, мы благодарны сотрудникам ИЯФ СО РАН, работающим в лабораториях, научно-конструкторском отделе, службах инженерного обеспечения, экспериментальном производстве, всем тем, кто принимал участие в нелегкой повседневной эксплуатации комплекса ВЭПП-4, поддерживал его работоспособность, улучшал параметры и характеристики его систем.

Работа частично поддерживалась:

- государственными контрактами в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы», подпрограммы «Проведение исследований с использованием высокоэнергетических уникальных установок и комплексов» № 02.518.11.7003 от 18.04.2007 г., №02.518.11.7099 от 8.06.2009 г. и № 16.518.11.7002 от 12.05.2011 г.;
- государственным контрактом в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, направления 1 «Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий» № П522 от 5.08.2009 г.;
- грантами РФФИ
 - 07-02-01162 Эксперимент по прецизионному измерению масс D-мезонов с детектором КЕДР;
 - 07-02-00816 Измерение R в области энергии от 2 до 7 ГэВ с детектором КЕДР на ВЭПП-4М;
 - 07-02-00426 Прецизионное измерение массы τ -лептона;
 - 07-02-00661 Прецизионная проверка СРТ инвариантности по сравнению частот спиновой прецессии электрона и позитрона в накопителе;

- 08-02-00251 Новый метод калибровки энергетической шкалы коллайдера в эксперименте по прецизионному измерению массы τ -лептона;
- 08-02-00258 Измерение полной и лептонных ширин J/ψ -резонанса;
- 09-02-01143 Измерение полного сечения двухфотонного рождения адронов, поиск узких С-четных резонансов и измерение сечения рассеяния света на свете в области инвариантных масс 0.1 – 5 ГэВ;
- 09-02-01035 Измерение детектором КЕДР вероятности распада $\psi(2S)$ в пару мюонов;
- 10-02-00871 Измерение сечения двухфотонного рождения легких псевдоскалярных мезонов и пар $\pi^+\pi^-$ вблизи порога в электрон-позитронных столкновениях на коллайдере ВЭПП-4М;
- 10-02-00904 Детектор черенковских колец на основе «фокусирующего» аэрогеля.

Список литературы

- [1] *В.В. Анашин, В.М. Аульченко, Е.М. Балдин и др.* Детектор КЕДР // Препр. ИЯФ СО РАН 2010-40, Новосибирск, 2010.
- [2] *A.N. Skrinsky.* Storage Ring Program in Novosibirsk // Proc. of PAC-1973. San Francisco, USA, 1973, p. 756.
- [3] *Г.И. Бударкер и др.* Установка со встречными электрон-позитронными пучками на энергию 3.5 ГэВ (ВЭПП-3) // Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, т. 2, с. 37-39. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1970.
- [4] *В.В. Анашин, Б.А. Баклаков и др.* ВЭПП-4: Запуск и первые эксперименты // Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Изд-во ОИЯИ, 1981.
- [5] *А.А. Жоленец и др.* Ядерная физика, 1981, т. 34, в. 6(12), с. 1471-1481.
- [6] *A.S. Artamonov, S.E. Baru et al.* Physics Letters, vol. 118B, 1982, p. 225.
- [7] *А.Д. Буклин, Я.С. Дербенев, А.М. Кондратенко и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 75-64 и Труды V международной конференции по физике высоких энергий, Варшава, 1975.
- [8] *A.E. Bondar et al.* Polarization Measurement in Storage Rings of the Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk) // Proc. of 12 Int. Conf. on High-Energy Accel., Batavia, USA, 1983, p. 240-243.
- [9] *S.A. Belomestnykh et al.* An observation of the spin dependence of synchrotron radiation intensity // Nucl. Instr. Meth. A 227 (1984), №. 1, p. 173-181.
- [10] *S.E. Baru et al.* Experiments with detector MD-1 at the collider VEPP-4 in the energy region of Υ -mesons. // Physics Reports 267 (1996) p. 71-159.
- [11] *A.E. Blinov et al. (MD-1 collaboration)* Phys. Lett. B 113 (1982) p. 423.
- [12] *А.А. Авдиенко, А.А. Жоленец и др.* Проект модернизации накопителя ВЭПП-4 для проведения монохроматических экспериментов // Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино 19-21 окт. 1982 г., т. 1 с. 220-227.
- [13] *С.А. Никитин и др.* Анализ вариантов получения продольно поляризованных встречных пучков на накопителе ВЭПП-4 // Труды международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий, Дубна, 17-20 ноября 1981 (сборник «Спин в физике высоких энергий», Дубна, 1982).
- [14] *A. Aleshaev et al.* VEPP-4 Control System // Proc. of ICALEPCS-1995, Chicago, USA, 1995.

- [15] *O. Meshkov, M. Fedotov, V. Gurko et al.* The upgraded optical diagnostic of the VEPP-4M collider // Proc. of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004.
- [16] *E.G. Miginskaya, I.I. Morozov, V.M. Tsukanov, A.A. Volkov.* Temperature stabilization of RF cavities of VEPP-4M Electron-Positron Facility // Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk, 2006.
- [17] *Е.Н. Дементьев, С.Е. Карнаев, С.А. Крутихин и др.* Запуск систем обратной связи на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // Письма в ЭЧАЯ, 2010. т. 7, № 7 (163). с. 765-773.
- [18] *S.Z. Akhmadaliev et al.* Experimental investigation of high-energy photon splitting in atomic fields // Phys. Rev. Lett. 2002, vol. 89., p. 061802.
- [19] *S.Z. Akhmadaliev, G.Ya. Kezerashvili et al.* Delbruck scattering at energies of 140-450 MeV // Phys. Rev. 1998, vol. 58, No. 5, p. 2844-2850.
- [20] *H.S. Ahn, V.M. Aulchenko et al.* Study of characteristics of the BELLE CsI calorimeter prototype with a BINP tagget photon beam // Nucl. Instr. Meth. A 410 (1998) p. 179-194.
- [21] *S.A. Nikitin.* Influence of Errors in KEDR Detector Field Compensation on the Spin Tune Shift and the Beam Polarization Lifetime in VEPP-4M Collider at Energy of Tau Lepton Production Threshold // Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk, 2006.
- [22] *V. Kiselev, E. Levichev, V. Sajaev, V. Smaluk.* Experimental Study of Nonlinear Beam Dynamics at VEPP-4M // Nucl. Instr. Meth. A 4406 (1998), p. 356-370.
- [23] *S. Glukhov, V. Kiselev, E. Levichev et al.* Study of Beam Dynamics during the Crossing of Resonance in the VEPP-4M Storage Ring // ICFA Beam Dyn. Newslett. №. 48 (2009), p. 171.
- [24] *V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, S.E. Karnaev et al.* Absolute Calibration of Particle Energy at VEPP-4M // Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002), p. 81-85.
- [25] *Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомяжков А.В. и др.* Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // ЖЭТФ т. 136, вып. 4 (2009), с. 690–702.
- [26] *О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, А.В. Богомяжков и др.* Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4М с детектором КЕДР // Приборы и техника эксперимента, 2010, № 1, с. 20–33.
- [27] *В.А. Киселев, В.В. Смалюк.* Экспериментальное изучение импедансов связи электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М // ЖТФ, т. 80, вып. 7 (2010).
- [28] *V. Blinov, A. Bogomyagkov, G. Karpov et al.* Study of the Possibility of Increasing the Accuracy of CPT // ICFA Beam Dyn. Newslett. №. 48 (2009), p. 207.
- [29] *V.E. Blinov, V.V. Kaminsky, E.B. Levichev et al.* Beam Energy and Energy Spread Measurement by Compton Backscattering of Laser Radiation at the VEPP-4M Collider // ICFA Beam Dyn. Newslett. №. 48 (2009), p. 195.

- [30] *E.N. Dement'ev, S.E. Karnaeov, S.A. Krutikhin et al.* Commissioning Feedback Systems at VEPP-4M Electron-Positron Collider // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2010, Vol. 7, №. 7, p. 466-472.
- [31] *V. Cherepanov, V. Oreshonok, V. Smaluk, D. Sukhanov.* Transverse Bunch-by-bunch Digital Feedback for the VEPP-4M Collider // *Proc. of RuPAC-2010*. Protvino, Russia, 2010.
- [32] *К.В. Астрелина, М.Ф. Блинов, Т.А. Всеволожская и др.* Получение интенсивных позитронных пучков на инжекционном комплексе ВЭПП-5 // *ЖЭТФ* 2008, т. 133, вып. 1., с. 94-114.
- [33] *V.M. Aulchenko, V. Balashov, E.M. Baldin et al.* New precision measurement of the J/ψ and ψ' -meson masses // *Physics Letters B* 573 (2003) p. 63-79.
- [34] *V.M. Aulchenko, E.M. Baldin, A.K. Barladyan et al.* Precision measurements of masses of charmonium states // *Proceedings of Science (HEP 2005)* 115, 2006.
- [35] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Results on J/ψ , $\psi(2s)$, $\psi(3770)$ from KEDR // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 181-182 (2008) p. 353.
- [36] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Study of the process $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ at KEDR detector // *Ядерная физика* 72, №. 3 (2009), с. 1-6.
- [37] *A.G. Shamov for KEDR collaboration.* Tau threshold experiments: status and expectations // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 144 (2005), p. 113-119.
- [38] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 169 (2007), p. 125-131.
- [39] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Measurements of the tau lepton mass at KEDR detector // *Письма в ЖЭТФ* 85 (2007), с. 429-434.
- [40] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Tau mass measurement at KEDR // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 181-182 (2008), p. 311.
- [41] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Tau mass measurement at KEDR // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 189 (2009), p. 21-23.
- [42] *S. Eidelman.* Tau lepton decays // *Chinese Physics C*, vol. 34 (2010), p. 896.
- [43] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Measurement of $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$ and $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$ // *Physics Letters B* 685 (2010), p. 134-140.
- [44] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Measurement of D^0 and D^+ meson masses with the KEDR detector // *Physics Letters B* 686 (2010), p. 84-90.
- [45] *A.G. Shamov for KEDR collaboration.* Measurement of J/ψ leptonic width with the KEDR detector // *Chinese Physics C*, vol. 34, No. 6 (2010), p. 836-841.
- [46] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Measurement of $J/\psi \rightarrow \eta_c\gamma$ at KEDR // *Chinese Physics C*, vol. 34, No. 6 (2010), p. 831-835.

- [47] *K.Yu. Todyshev, V.V. Anashin, V.M. Aulchenko et al.* Measurement of $\psi(3770)$ parameters with KEDR detector at VEPP-4M // Proceedings of Science (ICHEP 2010) 218, 2010.
- [48] *V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al.* Recent results from the KEDR detector // Chinese Physics C, vol. 34, №. 6 (2010), p. 650-655.
- [49] *V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, V.P. Cherepanov et al.* Beam Energy Measurements at VEPP-4M Collider by Resonant Depolarization Technique // ICFA Beam Dyn. Newslett. №. 48 (2009), p. 181.
- [50] *R.H. Schindler et al.* // Phys. Rev. D 24 (1981), p. 78.
- [51] *S. Barlag et al.* // Z. Phys. C 46 (1990), p. 563.
- [52] *C. Cawlfeld et al.* // Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 092002.
- [53] *И.Я. Протопопов.* Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-3 // дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 1970.
- [54] <http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/>
- [55] *M.V. Dyug, L.G. Isaeva, B.A. Lazarenko et al.* Internal Polarized Deuterium Target with Cryogenic Atomic Beam Source // Nucl. Instrum. and Meth. A 495 (2002), p. 8-19.
- [56] *J. Arrington, V.F. Dmitriev, R.J. Holt et al.* Two-photon exchange and elastic scattering of electrons/positrons on the proton // arXiv:nucl-ex/0408020.
- [57] *M.V. Dyug, A.V. Grigoriev, V.A. Kiselev et al.* Moeller Polarimeter for VEPP-3 Storage Ring Based on Internal Polarized Gas Jet Target // Nucl. Instr. and Meth. A 536 (2005), p. 338-343.
- [58] *I.A. Rachek, L.M. Barkov, S.L. Belostotsky et al.* Measurement of Tensor Analyzing Powers in Deuteron Photodisintegration // Phys. Rev. Lett. 98, 182303 (2007).
- [59] *Д.М. Николенко, Л.М. Барков, В.Ф. Дмитриев и др.* Измерение компонент тензорной анализирующей способности реакции когерентного фоторождения π^0 -мезона на дейтроне // Письма в ЖЭТФ, т. 89, № 9 (2009), с. 518-523.
- [60] *Д.М. Николенко, Х. Арнховель, Дж. Аррингтон и др.* Эксперименты с внутренними мишенями на накопителе электронов ВЭПП-3 // Ядерная физика, т. 73, № 8 (2010), с. 1-17.
- [61] *Л.М. Барков, В.В. Гаузитейн, В.Ф. Дмитриев и др.* Тензорная асимметрия в реакции фотообразования π^- мезонов на поляризованных дейтронах // Известия РАН. Серия Физическая, т. 74, № 6 (2010), с. 769.
- [62] *Г.И. Буджер и др.* Патент США №3885193, 1975.
- [63] *С.Б. Вассерман, В.Г. Вещеревич, Б.И. Гришанов и др.* Запуск позитрон-электронного источника для ВЭПП-4 // Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1979, т. 1, с. 128.

- [64] *С.Б. Вассерман и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 79-111. Новосибирск, 1979.
- [65] *М.М. Карлинер и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 84-110. Новосибирск, 1984.
- [66] *М.М. Карлинер и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 82-18, Новосибирск, 1982.
- [67] *В.А. Таярский.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 75-39. Новосибирск, 1975.
- [68] *В.В. Петров.* Сильноточный синхротрон Б-3М — инжектор для позитрон-электронного накопителя ВЭПП-2 // дисс. к.ф-м.н., Новосибирск, 1969.
- [69] *А.А. Лившиц.* Электронный синхротрон Б-4 на энергию 500 МэВ // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1970.
- [70] *И.И. Авербух и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 71-21. Новосибирск, 1971.
- [71] *В.Ф. Клюев и др.* Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, с. 101, Дубна, 1981.
- [72] *И.И. Авербух, Ю.М. Глуховченко, В.В. Петров, В.Г. Ческидов.* Препр. ИЯФ СО РАН 2011-7. Новосибирск, 2011.
- [73] *А.С. Калинин.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 81-105. Новосибирск, 1981.
- [74] *Н.А. Винокуров, И.Б. Дробязко, Г.Н. Кулипанов и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 89-118. Новосибирск, 1989.
- [75] *A.N. Aleshaev, I.V. Pinaev, V.M. Popik et al.* A study of the influence of synchrotron radiation quantum fluctuations on the synchrotron oscillations of a single electron using undulator radiation // Nucl. Inst. Meth. A 359 (1995), p. 80-84.
- [76] *G.Ya. Kezerashvili, A.M. Milov, N.Yu. Muchnoi, A.P. Usov.* A Compton Source of High Energy Polarized Tagged Gamma-Ray Beam. The ROKK-1M Facility // Nucl. Inst. Meth. B 5 (1998), p. 40-48.
- [77] *Б.А. Баклаков.* Прецизионная стабилизация электромашинных источников тока для питания магнитных систем накопителей заряженных частиц // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1980.
- [78] *С.П. Петров.* Разработка тиристорных источников стабилизированного тока для питания магнитных элементов накопителей заряженных частиц накопителей заряженных частиц // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1989.
- [79] *В.Ф. Веремеенко.* Прецизионные элементы системы питания магнитных структур накопителя заряженных частиц // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1989.
- [80] *А.С. Медведко.* Разработка и исследование автоматизированных систем измерения и коррекции равновесной орбиты пучка в накопителе заряженных частиц // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1989.
- [81] *Б.А. Баклаков, В.Ф. Веремеенко, М.М. Карлинер и др.* Препр. ИЯФ СО АН СССР 72-67. Новосибирск, 1972.

- [82] *Г.Н. Острейко.* Устройства высокочастотного питания комплекса установок встречных электрон-электронных и позитрон-электронных пучков // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1967.
- [83] *В.В. Анашин.* Разработка и запуск вакуумных систем ускорительно-накопительных комплексов ВЭПП-3, ВЭПП-4 и НАП-М Института ядерной физики // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1983.
- [84] *В.А. Киселев.* Разработка и создание систем транспортировки пучков ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4М // дисс. к.т.н., Новосибирск, 1997.
- [85] *Ю.Ф. Токарев.* Системы импульсного питания ускорителей и каналов транспортировки заряженных частиц // дисс. к.т.н., Новосибирск, 2001.
- [86] *В.П. Черепанов.* Управление параметрами пучков в ионных синхротронах и каналах транспортировки // дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 2000.
- [87] *В.А. Киселев, А.И. Науменков, В.В. Смалюк, В.П. Черепанов.* Автоматизированная система измерения и коррекции траектории пучка в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4М на основе датчиков тока изображения // Труды XIV Сессии по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994
- [88] <http://mad.home.cern.ch/mad/mad8web/mad8.html>
- [89] <http://v4.inp.nsk.su/vepp4/lattice.html>
- [90] *G.V. Karpov, A.S. Medvedko, E.I. Shubin,* Precise magnetometers on base of pulsed NMR technologies // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, Russia, 2006.
- [91] *E. Gorniker, P. Abramsky, V. Arbutov et al.* RF System of VEPP-4M Electron-Positron Collider // Proc. of PAC-95. Dallas, USA, 1995.
- [92] *П.Ю. Абрамский, В.С. Арбузов, А.А. Бушуев и др.* Мощные высокочастотные системы ИЯФ СО РАН // Труды XVI сессии по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998.
- [93] *О.В. Анчуглов.* Высоковольтные устройства для управления пучками в ускорителях заряженных частиц // дисс. к.т.н., Новосибирск, 2010.
- [94] <http://www.apisensor.com/tracker3-usa>
- [95] *V.S. Arbutov et al.* Feedback system for damping of longitudinal bunch oscillations in VEPP-4M collider // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, Russia, 2006.
- [96] *Chao A.* Physics of Collective Beam Instabilities. Wiley, N.Y., 1993.
- [97] *Myers S.* // LEP Note 436. CERN, Geneva, Switzerland, 1983.
- [98] *Ruth R.* Reactive Feedback in the Two Particle model // CERN LEP-TH/83-22, Geneva, Switzerland, 1969..
- [99] *Ruth R.* // Proc. of HEACC 1983, Fermilab, USA, 1983, p. 389.

- [100] *Danilov V.V., Perevedentsev E.A.* Feedback System for Elimination of the Transverse Mode Coupling Instability // CERN SL/93-38 (AP), Geneva, Switzerland, 1993.
- [101] *Myers S.* Conclusions of the Fifth LEP Performance Workshop // CERN SL/95-10 (DI), Geneva, Switzerland, 1995.
- [102] *Karliner M., Kiselev V., Medvedko A., Smaluk V., Zelenin A., Zinevich N.* The Feedback System for Elimination the Fast Head-tail Instability at Storage Ring VEPP-4M // Proc. of EPAC-1996. Barcelona, Spain, 1996.
- [103] *Karliner M., Popov K.* Theory of a Feedback to Cure Transverse Mode Coupling Instability // Nucl. Instr. and Meth. A 537 (2005), p. 481–500.
- [104] *V.P. Cherepanov, E.N. Dementev, A.S. Medvedko, V.V. Smaluk, D.P. Sukhanov.* The VEPP-4M transverse bunch-by-bunch feedback system // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, 2006.
- [105] *V.V. Oreshonok, V.P. Cherepanov, V.V. Smaluk, D.P. Sukhanov.* Broadband Digital Feedback System for the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Proc. of DIPAC-2011. Hamburg, 2011.
- [106] *V.P. Cherepanov.* Video Pulse Power Amplifier for Accelerator Technology Applications // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, 2006.
- [107] *А.Д. Бужин и др.* // Труды V Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц, Варшава, 1975, с. 138-162.
- [108] *А.А. Соколов, И.М. Тернов.* // ДАН СССР, 1963, т. 153(5), с. 1052-1054.
- [109] *A.E. Bondar et al.* // Proc. of 12th Int. Conf. High Energy Accelerators, 1983, p. 240-243.
- [110] *V.E. Blinov et al.* // NIMA 598 (2009) p. 23-30.
- [111] *Н.И. Зиневич, Е.И. Шубин.* // Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-11. Новосибирск, 1984.
- [112] *С.А. Никитин.* // Препринт ИЯФ СО РАН 2005-54. Новосибирск, 2005.
- [113] *V.E. Blinov et al.* // NIMA 494 (2002), p. 68-74.
- [114] *V.E. Blinov et al.* // NIMA 494 (2002), p. 75-80.
- [115] *S. Nikitin.* // Proc. of RuPAC-2006 MOAP01. Novosibirsk, 2006, p. 150-152.
- [116] *A. Bogomyagkov, A. Shamov, S. Nikitin* // Proc. of RuPAC-2006 MOAP02. Novosibirsk, 2006, p. 153-155.
- [117] *A. Bogomyagkov et al.* // Proc. of EPAC-2002. Paris, 2002, p. 386-388.
- [118] *A. Bogomyagkov et al.* // Proc. of PAC-2007 MOOBKI01. Albuquerque, 2007, p. 63.
- [119] *A. Bogomyagkov, S. Nikitin, V. Telnov, G. Tumaikin* // Proc. of APAC-2004, TUP11002. Gyeongju, 2004.

- [120] *Ian C. Hsu, Cha-Ching Chu, Chuan-Ing Yu et al.* Energy Measurement of Relativistic Electron Beams by Laser Compton Scattering // Proc. of EPAC-1996. Barcelona, 1996.
- [121] *R. Klein et al.* Measurement of the BESSY II Electron Beam Energy by Compton-backscattering of Laser Photons // NIM A 486 (2002) p. 545.
- [122] *A. Bogomyagkov, S. Karnaev, S. Mishnev et al.* Automation of Operations on the VEPP-4 Control System // Proc. of 10th ICALEPCS. Geneva, 2005.
- [123] *Г.С. Пискунов, С.В. Тарарышкин* Двадцатичетырехразрядная ЭВМ в стандарте САМАС // Автометрия, 1986, № 4.
- [124] *А.Н. Алешаев* Программное обеспечение для микроэвм Одренок. Операционная система ОДОС // Препр. ИЯФ СО АН СССР 89-67. Новосибирск, 1989.
- [125] *V. Blinov, A. Bogomyagkov, M. Fedotov et al.* Linux-Based Toolkit on the VEPP-4 Control System // Proc. of 8th ICALEPCS. San Jose, 2001.
- [126] *E. Goman, S. Karnaev, O. Plotnikova, E. Simonov.* The Database of the VEPP-4 Accelerating Facility Parameters // Proc. of PCaPAC08, Ljubljana, 2008.
- [127] *A.S. Kalinin, D.N. Shatilov, E.A. Simonov, V.V. Smaluk.* A Beam Diagnostic System for Storage Rings // Proc. of EPAC-1996. Barcelona, 1996.
- [128] *A.S. Kalinin, A.N. Dubrovin, D.N. Shatilov, E.A. Simonov, V.V. Smaluk* Application of Beam Diagnostic System at the VEPP-4 // Proc. of EPAC-1996. Barcelona, 1996.
- [129] *Батраков А.М., Калинин А.С., Протопопов И.Я., Хильченко А.Д.* Диагностика впускаемого и циркулирующего пучков с помощью пикап-электродов в накопителе ВЭПП-4 // Препр. ИЯФ СО АН СССР 80-167. Новосибирск, 1980.
- [130] *В.В. Смалюк.* Диагностика поперечного движения пучка в накопителе: разработка и развитие методов, их практическая реализация на комплексе ВЭПП-4 // дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 1999.
- [131] *V. Smaluk.* Discrete spectral analysis of beam oscillation // NIM A 578 (2007) 306314.
- [132] *Дубровин А.Н., Калинин А.С., Симонов Е.А., Смалюк В.В., Шатилов Д.Н.* Измерение и коррекция бета-функции накопителя ВЭПП-4М // Труды XIV Сочетания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994.
- [133] *E.A. Bekhtenev, G.V. Karpov.* Wideband BPM Electronics for the VEPP-4M Collider // Proc. of RuPAC-2010. Protvino, 2010.
- [134] *Б.А. Баклаков, В.Ф. Веремеенко, М.М. Карлинер, А.А. Литвинов, С.П. Петров* Магнитомодуляционный измеритель тока пучка заряженных частиц // Препр. ИЯФ СО АН СССР 74-70. Новосибирск, 1974.
- [135] *O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev et al.* The Upgraded Optical Diagnostic of the VEPP-4M Collider // Proc. of EPAC-2002. Paris, 2002.

- [136] Э.И. Зинин Стробоскопический метод электронно-оптической хронографии с пикосекундным разрешением на основе диссектора с электростатической фокусировкой и отклонением // Препр. ИЯФ СО АН СССР 81-84. Новосибирск, 1981.
- [137] M.G. Fedotov et al. Transverse beam profile measurement at the VEPP-4M collider // Proc. of EPAC-2002. Paris, 2002.
- [138] A.V. Bogomyagkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev et al. New fast beam profile monitor for electron-positron colliders // Rev. Sci. Instrum. 2007, vol. 78, №. 4, 043305.
- [139] O.I. Meshkov, A.N. Zhuravlev, V.V. Smaluk. Multi-pinhole camera for beam position and vertical angle stabilization // JINST 5 (2010), P03004.
- [140] V. Kaplin, S. Karnaev, A. Kvashnin, I. Morozov, O. Plotnikova. The precision temperature measuring system of the VEPP-4M electron-positron collider // Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk, 2006.
- [141] V. Kaplin, S. Karnaev, A. Kvashnin, O. Plotnikova, S. Vasichev. The Total-Temperature Measurements and Interlock System at the VEPP-4M Collider // Proc. of PCaPAC08, Ljubljana, 2008.
- [142] <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS1631-DS1731.pdf>
- [143] E.G. Miginskaya, I.I. Morozov, V.M. Tsukanov, A.A. Volkov. Temperature stabilization of RF-cavities of VEPP-4M Electron-Positron Facility // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, 2006.
- [144] <http://www.advantech.com/products/search.aspx?keyword=ADAM>
- [145] Ya.S. Derbenev et al. Radiative polarization: obtaining, control, using // Particle Accelerators, vol. 8, №. 2 (1978), p. 115-126.
- [146] V.E. Blinov et al. Measurement of the energy dependence of tousek electron counting rate // Proc. of PAC-2011. New York, 2011.
- [147] С.А. Никитин, И.Б. Николаев. Расчет интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М // Препр. ИЯФ СО РАН 2010-42, Новосибирск, 2010.
- [148] V.A. Kiselev et al. Beam energy spread measurement at the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Journal of Instrumentation, vol. 2 №. 6 (2007) P06001.
- [149] T. Nakamura et al. Chromaticity for energy spread measurement and for cure of transverse multi-bunch instability in the SPRING-8 storage ring // Proc. of PAC-2001. Chicago, 2001, p. 1972-1974.
- [150] O.I. Meshkov et al. VEPP-4M optical beam profile monitor with one-turn temporal resolution // Proc. of EPAC-2004, Lucerne, 2004, p. 2733-2735.
- [151] Н.А. Винокуров, В.Н. Корчуганов, Г.Н. Кулипанов, Е.А. Переведенцев. Влияние хроматичности и кубической нелинейности на кинематику бетатронных колебаний // Препр. ИЯФ СО АН СССР 76-87, Новосибирск, 1976.

- [152] *A.A. Валишев.* Исследование когерентных эффектов взаимодействия встречных пучков и динамической апертуры на накопителе ВЭПП-2М // дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 2000.
- [153] *A. Kalinin, V. Smaluk.* Turn-by-turn phase space diagram construction for nonlinear betatron oscillations // Proc. of DIPAC-1999. Chester, 1999, p. 112-114.
- [154] *S. Nikitin.* Adiabatic theory of slow extraction of particles from a synchrotron // Proc. of EPAC-2006. Edinburgh, 2006, p. 2119-2121.
- [155] *V. Kiselev, V. Smaluk.* Experimental Study of Impedances and Instabilities at the VEPP-4M Storage Ring // Proc. of EPAC-1998. Stockholm, Sweden, 1998.
- [156] *A. Hofmann, J. Maidment* Current Dependent Phenomena in LEP // CERN LEP Note 168. Geneva, 1979.
- [157] *V. Kiselev, V. Smaluk* A Method for Measurement of Transverse Impedance Distribution along a Storage Ring // Proc. of DIPAC-1999. Chester, 1999.
- [158] *V. Kiselev, V. Smaluk* Measurement of Local Impedance by an Orbit Bump Method // Nucl. Instr. and Meth. A 525 (2004), p. 433.
- [159] *D. Brandt et al.* Measurement of Impedance Distribution and Instability Threshold in LEP // Proc. of PAC 1995. Dallas, USA, 1995, p. 570.

А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов, А.М. Батраков, Е.А. Бехтенов, В.Е. Блинов, А.В. Богомягков, А.Е. Бондарь, Д.Б. Буренков, С.П. Васичев, В.Ф. Веремеенко, С.А. Глухов, Ю.М. Глуховченко, О.П. Гордеев, В.Н. Ерохов, В.Н. Жилич, А.И. Жмака, А.Н. Журавлев, Э.И. Зинин, В.В. Каминский, В.И. Каплин, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселев, В.Р. Козак, Г.И. Кузнецов, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, Г.Я. Куркин, Е.Б. Левичев, В.Р. Мамкин, А.С. Медведко, О.И. Мешков, А.И. Михайлов, Л.А. Мироненко, С.И. Мишнев, И.И. Морозов, Н.Ю. Мучной, В.В. Нейфельд, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, Д.М. Николенко, В.К. Овчар, И.Н. Окунев, А.П. Онучин, В.В. Орешонок, В.Н. Осипов, В.В. Петров, В.М. Петров, П.А. Пиминов, О.А. Плотникова, А.В. Полянский, Ю.А. Пупков, В.В. Репков, Е.А. Ротов, В.К. Сандырев, В.В. Свищев, И.К. Седяров, А.Н. Селиванов, Е.А. Симонов, С.В. Синяткин, А.Н. Скринский, В.В. Смалюк, Е.В. Старостина, Д.П. Суханов, С.В. Тарарышкин, Ю.А. Тихонов, Д.К. Топорков, Г.М. Тумайкин, И.Ф. Утюпин, М.Г. Федотов, А.Д. Хильченко, В.М. Цуканов, В.П. Черепанов, И.Н. Чуркин, А.Г. Шамов, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов, С.В. Шиянков, Е.И. Шубин

Ускорительный комплекс ВЭПП-4

ИЯФ 2011-20

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 1.07. 2011

Сдано в набор 4.07. 2011

Подписано в печать 4.07. 2011

Формат 60x90 1/16 Объем 10,0 печ.л., 8,0 уч.-изд.л.

Тираж 300 экз. Бесплатно. Заказ №20

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