

# Статус и перспективы встречных $e^+e^-$ -пучков в Новосибирске

И.Я. Протопопов, Ю.М. Шатунов

ГНЦ РФ ИЯФ им.Г.И.Буджера СО РАН, Новосибирск, Россия

## 1. Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2М

Установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М последние 20 лет работает в диапазоне энергий  $2E$  от 0,4 до 1,4 ГэВ, охватывая область рождения  $\rho, \omega, \phi$ -мезонов.

Ускорительный комплекс ВЭПП-2М (рис. 1) состоит из инжектора, включающего линейный ускоритель ИЛУ на 3 МэВ и электронный синхротрон Б-3М на 250 МэВ, бустера-синхротрона БЭП для накопления электронов и позитронов и ускорения их до 900 МэВ, и коллайдера ВЭПП-2М до 700 МэВ [1]. Максимальная светимость ВЭПП-2М зависит от энергии встречных частиц по закону  $E^4$ . Для энергии  $2E = 1$  ГэВ она равна  $5 \cdot 10^{30} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ . Лучшие значения достигнутой интенсивности пучка в режиме одного сгустка:

- 0.2 А ( $0.8 \cdot 10^{11}$ ) на ВЭПП-2М,
- 0.6 А ( $3 \cdot 10^{11}$ ) на БЭП.

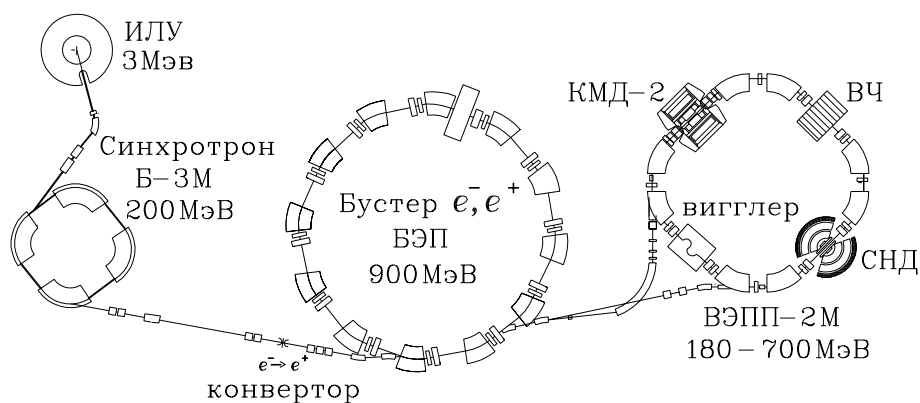


Рис. 1: Схема комплекса ВЭПП-2М.

С 1992 года на ВЭПП-2М ведутся эксперименты с детектором КМД-2 [2], а в начале 1995-го начал сбор данных новый немагнитный Сферический Нейтральный Детектор (СНД) [3]. В настоящий момент оба детектора КМД-2 и СНД расположенные на ВЭПП-2М точно друг напротив друга, работают одновременно.

В 1995 г. на детекторе КМД-2 был накоплен интеграл светимости около  $800 \text{ нб}^{-1}$  в диапазоне энергий между  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонами при сканировании с шагом 10 МэВ. Энергия пучка в каждой точке измерялась с точностью  $1 \cdot 10^{-4}$  методом резонансной деполяризации.

В феврале 1995 г. начались эксперименты на Сферическом Нейтральном Детекторе. В 1996 г. детектор СНД набрал  $\simeq 4,5 \text{ нб}^{-1}$  в области  $\phi$ -мезонного резонанса.

## 2. Круглые пучки на ВЭПП-2М

В последнее время в различных лабораториях рассматриваются, а во Фраскати и в Новосибирске находятся в стадии разработки  $e^+e^-$ -коллайдеры со светимостью  $L \simeq 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на энергии 510 МэВ, — так называемые  $\Phi$ -фабрики.

В Новосибирском проекте высокий уровень светимости будет достигнут при использовании режима круглых встречных пучков [4, 5].

Круглые пучки означают:

1. Равные и малые значения  $\beta$ -функций:  $\beta_0 = \beta_x, \beta_z$ .
2. Равные поперечные эмиттансы  $\epsilon_0 = \epsilon_x = \epsilon_z$ .
3. Равные бетатронные частоты  $\nu_x, \nu_z$  и "нулевая" связь.
4. Малые положительные дробные части частоты.
5. Малая управляемая синхротронная частота  $\nu_s$ .

Результатом первых трех пунктов является сохранение продольной компоненты момента импульса, (т.е. появление дополнительного интеграла движения), что делает поперечное движение "одномерным" и тем самым подавляет эффекты встречи, которые вызывают раздувание пучков и уменьшение времени жизни.

Пункты 4 и 5 важны для увеличения параметра пространственного заряда  $\xi_{max}$ , который характеризует эффекты встречи. Мы надеемся увеличить значение  $\xi_{max}$  по крайней мере до 0,1 в сравнении с 0,05, достигнутым сейчас для плоских пучков. Дополнительный полезный эффект возникает благодаря тому, что параметр пространственного заряда для данной плотности сгустка в 2 раза меньше для круглых пучков, чем для плоских.

Имеется множество аргументов за режим круглых пучков. Лучший способ доказать все доводы "за" и "против" — это эксперимент. Мы нашли уникальную возможность проверить это на практике на ВЭПП-2М [6].

Существующая магнитная структура ВЭПП-2М имеет 4 симметричных магнита с низкой  $\beta^*$ -функцией ( $\beta_z = 5 \text{ см}$ ,  $\beta_x = 40 \text{ см}$ ) в месте встречи, которая обеспечивается двумя квадрупольными дублетами. Два противоположных места встречи заняты детекторами КМД-2 и СНД. Два оставшихся участка с низкой  $\beta^*$ -функцией заняты ВЧ-резонатором и сверхпроводящим вигглером. Сверхпроводящий вигглер имеет 5 полюсов с магнитным полем до 80 кГс. Система корректирующих катушек компенсирует оптическую расстройку от вигглера и от соленоидов детектора КМД-2.

Основная идея модификации структуры ВЭПП-2М для круглых пучков состоит в замене квадрупольных дублетов на сверхпроводящие соленоиды, встроенные внутрь детекторов (рис. 2). Соленоиды будут обеспечивать равные  $\beta^*$ -функции в местах

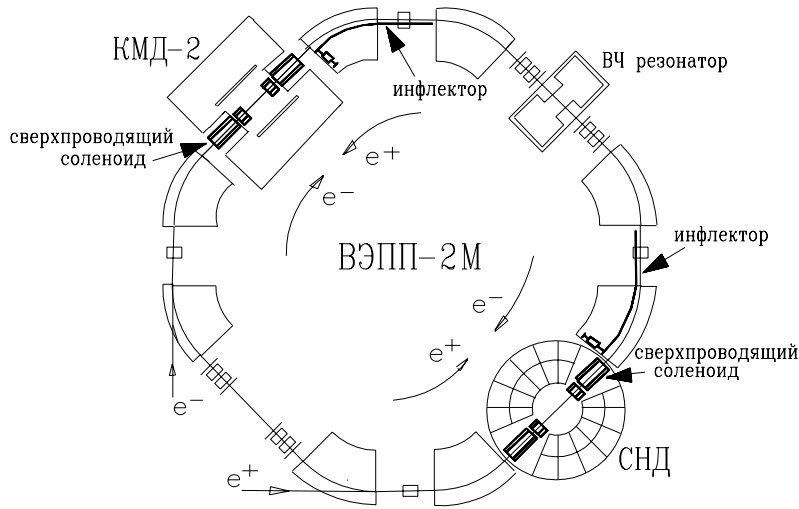


Рис. 2: Модификация ВЭПП-2М для круглых пучков.

встречи пучков и, кроме того, поворачивать на  $\pi/2$  плоскость бетатронных колебаний. Это будет последовательная смена вертикальной и горизонтальной ориентации плоских собственных бетатронных мод через каждые пол-оборота. Ослабленные на 10% оставшиеся 8 квадруполь преобразуют пол-оборотные матрицы в "ахромат", чтобы обеспечить нулевую дисперсию в обоих местах встречи (рис. 3). Коэффициент уплотнения орбит останется практически неизменным.

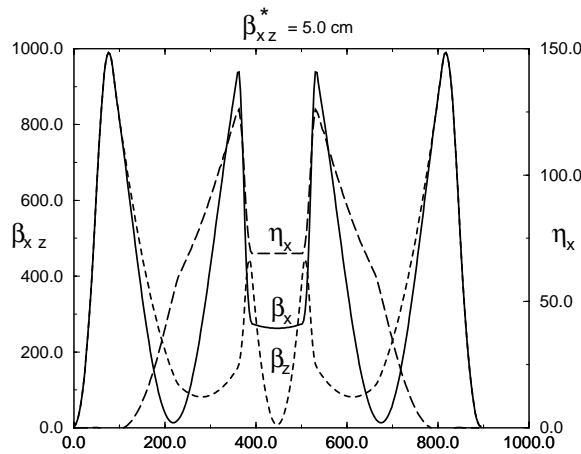


Рис. 3: Оптические функции ВЭПП-2М для круглых пучков.

Коррекция хроматизма осуществляется секступолями, расположенными по обе стороны от оставшихся квадрупольных дублетов и в технических промежутках. Натуральный хроматизм бетатронных частот с соленоидами

$$\gamma \cdot \frac{\partial \nu_x}{\partial \gamma} = -12, \quad \gamma \cdot \frac{\partial \nu_z}{\partial \gamma} = -13.$$

Таблица 1: Сравнительные характеристики ВЭПП-2М для плоских (с действующим Вигглером) и круглых пучков.

ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА И ОПТИКИ ВЭПП-2М			
Параметры		Плоский пучок	Круглый пучок
Длина кольца, м	$C$	17.88	17.88
ВЧ частота, МГц	$f_0$	200	200
Коэф. уплотнения орбит	$\alpha$	0.167	0.18
Эмиттанс, $см \cdot рад$	$\varepsilon_x$	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
	$\varepsilon_z$	$5.5 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
Потери энергии/оборот, кэВ	$\Delta E_0$	9.1	5.0
Безразмерные декременты колебаний	$\delta_z$	$9.8 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-6}$
	$\delta_x$	$8.5 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-6}$
	$\delta_s$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Энергия рассеяния	$\sigma_\varepsilon$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$
$\beta_x$ в МВ, см	$\beta_x$	48	5
$\beta_z$ в МВ, см	$\beta_z$	4.5	5
Бетатронные частоты	$\nu_x, \nu_z$	3.05, 3.1	3.1, 3.1
Частиц/сгусток	$e^-, e^+$	$2 \cdot 10^{10}$	$6.7 \cdot 10^{10}$
Параметр пространственного заряда	$\xi_x, \xi_z$	0.02, 0.05	0.1, 0.1
Светимость, $см^{-2} с^{-1}$	$L_{max}$	$\sim 5 \cdot 10^{30}$	$\sim 1 \cdot 10^{32}$

Магнитная структура ВЭПП-2М была оптимизирована для компенсации хроматизма бетатронной частоты и получения максимально возможной динамической апертуры.

Расчетные параметры режима круглых пучков приведены в таблице 1. Компьютерное моделирование эффектов встречи показывает возможность достижения на ВЭПП-2М светимости  $\sim 10^{32} см^{-2} с^{-1}$  при параметрах, приведенных в таблице 1.

### 3. Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-4

Комплекс ВЭПП-4 состоит из двух, с точки зрения эксперимента, установок: бустерного накопителя ВЭПП-3 и коллайдера ВЭПП-4М. Схема комплекса показана на рис. 4.

Комплекс работает круглосуточно, среди 730 возможных смен в 1995 ÷ 1996 гг. (с сентября по сентябрь) распределение было следующее:

- 30% — отпуска и запланированные остановки,
- 10% — незапланированные ремонтные работы,
- 35% — работа только накопителя ВЭПП-3,
- 25% — работа комплекса в целом.

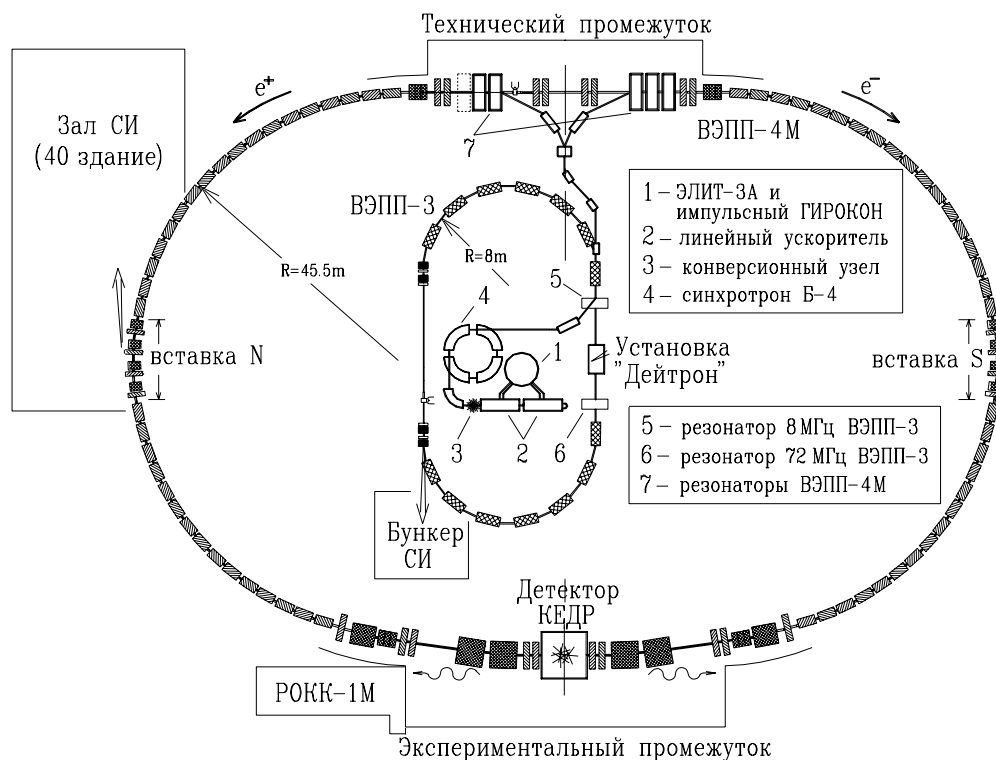


Рис. 4: Схема комплекса ВЭПП-4.

### 3.1. Накопитель ВЭПП-3

ВЭПП-3 — накопитель на энергию 2 ГэВ, типичные рабочие токи  $\approx 200$  мА, время жизни пучка до 6 часов. На накопителе в течение последних нескольких лет проводились и продолжают проводиться следующие самостоятельные эксперименты.

ДЕЙТОН — изучение электромагнитных свойств дейтрона в упругом и неупругом рассеяниях электронов на поляризованной сверхтонкой внутренней дейтронной мишени [7]. Работа ведется совместно с лабораториями США (ANL, Иллинойский университет), Нидерландов (Национальный институт ядерной физики), Томска, С.-Петербурга (СПИЯФ).

СИ — работы в рамках Сибирского центра синхротронного излучения [8]. Эксперименты ведутся по следующим темам:

- рентгенофлуоресцентный анализ,
- рентгеновская разностная микроскопия,
- стоячие рентгеновские волны,
- рентгенофлуоресцентный микронзонд,
- рентгеновская литография,
- рентгеновская топография,
- EXAFS-спектроскопия,
- разностная ангиография,
- дифракционное кино,
- малоугловое рассеяние,
- аномальное рассеяние,
- лауэ-дифрактометрия,
- LIGA-технология,
- люминесценция с временным разрешением.

В течение года на ВЭПП-3 работало около 50 групп из отечественных научных центров (в основном из институтов Сибирского отделения РАН), а также 8 групп из зарубежных стран (Англия — 1, Германия — 1, Корея — 2, Индия — 1, США — 2, Франция — 1).

ВЭПП-3 как бустерный накопитель обеспечивает в одногустковом режиме ток пучка  $e^-$  в ВЭПП-4М до 25 мА (соотношение периметров ВЭПП-4М и ВЭПП-3  $\simeq 5$ ). Скорость же накопления позитронов в ВЭПП-3 мала ( $\simeq 3$  мА в минуту), однако достаточна для проведения первого этапа работ на ВЭПП-4М со светимостью  $\simeq 2 \cdot 10^{31}$ .

### 3.2. Коллайдер ВЭПП-4М

ВЭПП-4М — электрон-позитронный коллайдер на энергию 6 ГэВ. Основные задачи ВЭПП-4М: работа в области энергии  $\Upsilon$ -мезона и обеспечение изучения двухфотонных процессов. Основные характеристики ВЭПП-4М приведены в таблице 2.

Таблица 2: Основные параметры коллайдера ВЭПП-4М.

Параметры	
Энергия, ГэВ	6
Периметр, м	366
Радиус поворота, м	45.5
Бетатронные частоты, $\nu_x, \nu_z$	8.53, 7.57
Коэф. уплотнения орбит, $\alpha$	0.017
Эмиттанс пучка, ( $мм \cdot мрад$ ), $\varepsilon_x, \varepsilon_z$	0.3, 0.001
Энергетический разброс, %	0.1
Потери энергии, МэВ/оборот	4
Время затухания синхр. колебаний, мс	2
Число гармоник	222
Длина сгустка, см	4
Параметры простр. заряда, $\xi_x, \xi_z$	0.005, 0.005
Число частиц в сгустке	$2 \cdot 10^{11}$
Число сгустков	$2 \times 2$
Ток пучка, мА	50
Светимость, $см^{-2} c^{-1}$	$\simeq 7 \cdot 10^{31}$
$\beta_z, \beta_x, \psi_x$ в МВ, см	5, 70, 80

Детектор КЕДР для проведения экспериментов на встречных  $e^+e^-$ -пучках находится на завершающем этапе сборки. Многие системы детектора уже были опробованы на пучках ВЭПП-4М, часть использовалась в экспериментах последних двух лет. В очередном заходе (1995 ÷ 1996 гг.) будут установлены все его системы, кроме калориметра на жидком криптоне.

На ВЭПП-4М работает установка РОКК-1М (Рассеянные обратно Комптоновские кванты) [9]. Использование ИАГ-лазера с энергией фотона 1,17 эВ вместе с возможностью изменять энергию пучка в ВЭПП-4М от 1,5 до 5,5 ГэВ позволяет получать

комптоновские кванты в диапазоне энергий от 40 до 800 МэВ при потоке  $3 \cdot 10^6 \cdot c^{-1}$ .

Задачи установки РОКК-1М на ближайшее время: измерение поляризации пучка в ВЭПП-4М с целью определения абсолютной энергии частиц, вращающихся в коллайдере, абсолютная калибровка системы регистрации рассеянных электронов (в двухфотонной физике) по краю комптоновского спектра, а также продолжение экспериментов по определению сечений фоторасщепления некоторых ядер.

К настоящему времени на ВЭПП-4М выполнены следующие физические работы:

- изучены фоны от электронов и позитронов во всем диапазоне энергий на различных системах детектора КЕДР,
- проведена калибровка системы рассеянных электронов [10],
- завершены измерения пространственного разрешения вершинного детектора,
- проведено исследование энергетического и пространственного разрешений жидкокриптонового калориметра детектора КЕДР,
- в коллаборации с КЕКВ (Япония) выполнено исследование энергетического и пространственного разрешения электромагнитного калориметра на основе кристаллов CsI(Tl) для детектора BELLE,
- совместно с физиками из Италии и Бразилии [11] ведутся работы по измерению полного сечения фотопоглощения ядер,
- впервые набрана статистика и ведется обработка результатов по расщеплению фотона в сильном кулоновском поле и измерению сечения Дельбрукского рассеяния,
- начаты работы по измерению поляризации пучка в ВЭПП-4М для абсолютной калибровки энергии частиц.

Из ускорительных задач, освоенных к настоящему времени, можно отметить следующие:

- подъем энергии до 5,5 ГэВ и спуск до 1,3 ГэВ (при энергии инжекции 1,8 ГэВ) без существенных потерь пучка,
- коррекция орбиты и частот,
- быстрое измерение бета-функции всего кольца и программная коррекция ее к расчетной [12],
- коррекция вертикальной  $\psi$ -функции (что важно для получения поляризации пучка),
- управление пучками (положение места встречи, величина  $\beta$ -функции в месте встречи, связь бетатронных колебаний, разведение пучков, многоступенчатый режим, декременты затухания и пр.),
- подавление вертикальной неустойчивости [13].

Можно надеяться, что не за горами достижение полноценной совместной работы ВЭПП-4М и детектора КЕДР по основной физической программе.

## Список литературы

- [1] G.M. Tumaikin et al. *Proc. of the 10th Int. Conf. on High Energy Acc.*, Serpukhov (1977), v.1, p.443.
- [2] CMD-2 Collaboration. *ICFA Instrumentation Bulletin*, 5 (1988), p.18.
- [3] V.V.Anashin et al. *Proc. of 5th Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics*, Novosibirsk (1990), p.360.
- [4] L.M.Barkov et al. *Proc.of the 14th Int. Conf. High Energy Acc.*, Tsukuba (1989), p.1385.
- [5] L.M.Barkov et al. *Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference*, San Francisco (1991), p.183.
- [6] A.N.Filippov et al. *Proc. of the 15th Int. Conf. High Energy Acc.*, Hamburg (1992), p.1145.
- [7] S.G.Popov et al. Status of the T20 experiment at VEPP-3, *Proc.of the 8th Int.Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Physics*, Sept, 1994, AIP Conf.Proc., v.339, 1995, p.530.
- [8] NIM A359(1995. *Proc. of 10th National Conference SR-94*.
- [9] G.Kezerashvili et al. ROKK-1M is compton source of the high intensity polarized and tagged Gamma beam at the VEPP-4M collider, *High Energy Spin Physics XIth Inter.Symposium*, AIP Conf.proc., v.343, p.260, New York, 1995.
- [10] V.Aulchenko et al. Detector KEDR tagging system for two-photon physics, *Nucl.Instr.& Meth. A 355*, (1995), p.261-267.
- [11] M.Terranova et al. Fissility of Bi, Pb, Au, Pt, W, Ta, V and Ti nuclei mesasured with 100 MeV Compton backscattered photons, *J.Phys.G:Nucl.Phys.22*, (1996), p.511-512.
- [12] А.Н.Дубровин и др. Измерение и коррекция бета-функции на накопителе ВЭПП-4М, *XIV Совецание по ускорителям зар. частиц*, Протвино, 1994.
- [13] А.М.Зеленин и др. Система обратной связи для подавления быстрой head-tail неустойчивости в накопительном кольце ВЭПП-4М, *Доклад на настоящей конференции*.