

СТАТУС УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-4

*А. Н. Журавлев, С. Е. Карнаев, Е. Б. Левичев, О. И. Мешков,
С. А. Никитин, И. Б. Николаев, П. А. Пиминов*¹

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

На ускорительном комплексе ВЭПП-4 проводятся эксперименты по физике элементарных частиц и ядерной физике, а также исследования с использованием синхротронного излучения и выведенных гамма-квантов высокой энергии. В статье представлен текущий статус комплекса и экспериментальных программ. Обсуждается развитие метода резонансной деполяризации для абсолютного измерения энергии частиц циркулирующего пучка, в том числе с помощью лазерного поляриметра. Приводятся результаты наблюдения азимутальной разности орбит электронов и позитронов, являющейся следствием потерь энергии на синхротронное излучение.

At the VEPP-4 accelerator complex experiments on high energy physics, nuclear physics, synchrotron radiation and hard X-ray are carried out. The paper presents the current status of the complex and its experimental programs. The development of the resonance depolarization method for the absolute beam energy measurement using a laser polarimeter is discussed. The results of observing the azimuthal difference of the orbits of electron and positron beams, which is a consequence of energy losses due to synchrotron radiation, are presented.

PACS: 29.20.dk; 41.75.Fr; 41.75.Ht; 13.66.Jn

ВВЕДЕНИЕ

Многофункциональный ускорительный комплекс ВЭПП-4 [1] предназначен для проведения экспериментов по физике высоких энергий (ФЭЧ) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР [2], экспериментов с использованием синхротронного излучения (СИ) [3, 4], экспериментов по ядерной физике на накопителе ВЭПП-3 с установкой «Дейтон» [5], а также развития технологий для физики ускорителей и детекторов частиц.

Комплекс ВЭПП-4 — часть уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-4–ВЭПП-2000 для проведения экспериментов по физике высоких энергий, экспериментов по ядерной физике и экспериментов с использованием синхротронного излучения», состоящей из инжекционного комплекса (ИК), длинного транспортного канала К-500, электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 и комплекса ВЭПП-4. Комплекс ВЭПП-4 (рис. 1, б) включает в себя многофункциональный накопитель электронов или позитронов ВЭПП-3, импульсный канал транспортировки ВЭПП3–ВЭПП4 и электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М.

¹E-mail: piminov@inp.nsk.su

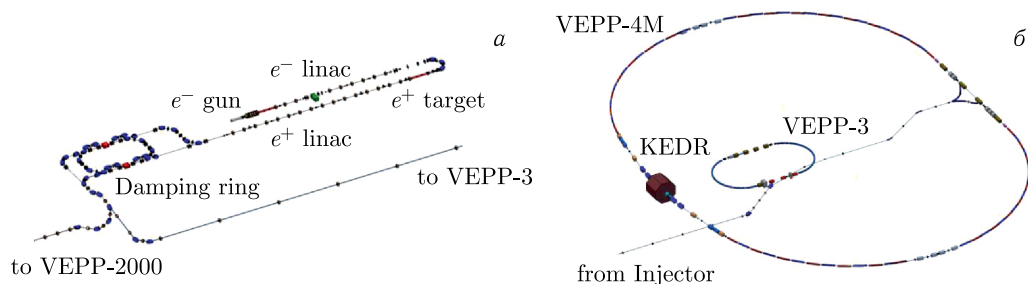


Рис. 1. Схемы инжекционного комплекса (а) и комплекса ВЭПП-4 (б)

Инжекционный комплекс (ИК) используется для получения пучков электронов и позитронов высокой интенсивности [6] и доставки их либо до комплекса ВЭПП-2000, либо до ВЭПП-4. Инжекционный комплекс (рис. 1, а) состоит из электронной пушки, линейного ускорителя электронов до энергии 270 МэВ, конверсионной системы, линейного ускорителя позитронов/электронов, ускоряющего частицы до 400 МэВ, и накопителя-охлаждителя (НО) для накопления и охлаждения пучков электронов или позитронов с энергией 400 МэВ. Частота работы линейных ускорителей может достигать 12,5 Гц, частота выпуска частиц из НО — 1 Гц.

Накопитель ВЭПП-3 предназначен для накопления пучков электронов или позитронов, промежуточного ускорения для перепуска пучков в коллайдер ВЭПП-4М, а также для проведения экспериментов с использованием синхротронного излучения и экспериментов по ядерной физике на установке «Дейтон». Кроме того, он служит источником поляризованных пучков для ВЭПП-4М в области энергий от 1,5 до 1,9 ГэВ. Поляризация частиц в накопителе происходит за счет естественного радиационного механизма Соколова–Тернова.

Накопитель ВЭПП-3 имеет форму рейстрекка с периметром 74,4 м. Энергия инжекции — 390 МэВ, максимальная энергия — 2 ГэВ. ВЭПП-3 имеет две ВЧ-системы: 8 и 72 МГц, работающие, соответственно, на 2-й и 18-й гармониках частоты обращения. Низкочастотная ВЧ-система (8 МГц) предназначена для накопления пучков частиц со смещением по фазе (продольная инжекция) и предварительного ускорения частиц до энергии 600 МэВ для подавления эффекта внутрисгусткового рассеяния.

На накопителе ВЭПП-4М проводятся эксперименты по ФЭЧ с детектором КЕДР, эксперименты с использованием СИ, эксперименты с выведенными пучками жестких гамма-квантов на установке «Выведенный пучок». ВЭПП-4М работает в диапазоне энергий частиц от 0,9 до 6 ГэВ. В настоящее время максимальная энергия (4,75 ГэВ) ограничена системой питания элементов периодичности полуколец. Коллайдер ВЭПП-4М имеет одну магнитную дорожку с периметром 366 м, включающую в себя четыре части: экспериментальный промежуток с детектором КЕДР, прямолинейный технический промежуток, в который осуществляется инжекция пучков и в котором размещаются пять ВЧ-резонаторов, и два полукольца. Оптика полуколец коллайдера (FBDB) определяется магнитами с совмещенными функциями, что приводит к неустойчивости синхротронного затухания. Для перераспределения декрементов затухания в техническом промежутке расположены две градиентные змейки (вигглеры Робинсона). Для увеличения фазового объема пучка и дополнительного

затухания в экспериментальном промежутке установлены две дипольные трехполюсные змейки с полем 2 Тл. Для разведения электронов и позитронов используются электростатические пластины, размещенные в четырех местах (в центре экспериментального промежутка, в серединах полуколец и в центре технического промежутка), что позволяет организовать одновременную циркуляцию двух сгустков электронов и двух сгустков позитронов с местом встречи в центре детектора КЕДР. Максимальная энергия инжектируемых частиц составляет 1,9 ГэВ. Инжекция в коллайдер осуществляется в вертикальном направлении. Энергия инжекции ограничена возможностями импульсных магнитов канала транспортировки от ВЭПП-3 до ВЭПП-4М. Ускорение пучков в коллайдере выполняется с максимальным темпом 20 МэВ/с. ВЧ-система работает на 222-й гармонике частоты обращения (180 МГц). Для обеспечения устойчивого движения пучков на ВЭПП-4М функционируют две системы [7]: система подавления вертикальных колебаний, позволяющая захватывать и ускорять в каждом сгустке заряд, в несколько раз превышающий пороговое значение, и система подавления фазовых колебаний, возникающих из-за различных расстройек сложной системы ВЧ-резонаторов. Обе системы работают независимо с каждым из циркулирующих сгустков.

Уникальной особенностью коллайдера ВЭПП-4М является наличие системы абсолютной калибровки энергии частиц пучка методом резонансной деполяризации [8], что позволяет проводить сверхточные эксперименты по физике высоких энергий, в том числе по измерению масс покоя элементарных частиц. В диапазоне низких энергий частиц (до 2 ГэВ) для фиксации момента деполяризации используется тушековский поляриметр. Поляризация электронов/позитронов в этом случае осуществляется в накопителе ВЭПП-3, и в коллайдер перепускается уже поляризованный пучок. При энергиях выше 4 ГэВ поляризация частиц происходит непосредственно в ВЭПП-4М, а для наблюдения за деполяризацией частиц используется лазерный поляриметр [9].

1. СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

1.1. Физика элементарных частиц. Эксперименты по физике высоких энергий проводятся на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР [2]. С 2000 по 2017 гг. проводились эксперименты в низком диапазоне энергий коллайдера (0,9–1,9 ГэВ) [10, 11]. С начала 2018 г. начат цикл экспериментов выше энергии инжекции в ВЭПП-4М (выше 1,9 ГэВ), что требует ускорения пучков в самом коллайдере.

Физическая программа КЕДР в этом диапазоне энергий включает следующие пункты:

- 1) измерение сечения рождения адронов в диапазоне энергий пучков 2,3–3,5 ГэВ с интегралом статистики $\sim 10 \text{ пб}^{-1}$,
- 2) измерение параметров Y -мезонов с интегралом статистики $\sim 50 \text{ пб}^{-1}$,
- 3) набор статистики для гамма-гамма-физики с интегралом статистики $\sim 200 \text{ пб}^{-1}$.

К настоящему времени выполнен первый пункт этой программы. Эксперимент состоял из набора статистики в 17 точках по энергии пучка с шагом $\sim 50 \text{ МэВ}$, выполненного за два сканирования (четные и нечетные шаги). Набор статистики осуществлялся по схеме 4 сигнальных захода и 1 фоновый заход (с разведенными

пучками). В фоновых заходах токи пучков поддерживались на таком же уровне, как и в сигнальных заходах. Энергия частиц пучка определялась по измерению поля с помощью ЯМР [12], который был прокалиброван с помощью абсолютного измерения энергии частиц методом резонансной деполяризации: с помощью тушековского поляриметра [8] на энергии инжекции (1,89 ГэВ) и выше с ускорением в ВЭПП-4М (1,93 и 1,98 ГэВ, см. п. 2.1), а также с помощью лазерного поляриметра [9] на энергии 4,06 ГэВ (см. п. 2.2). Набран интеграл статистики $\sim 7 \text{ пб}^{-1}$ в первом сканировании и $\sim 7 \text{ пб}^{-1}$ во втором. На рис. 2 показан темп набора интеграла светимости в этом эксперименте. Короткие горизонтальные участки соответствуют интервалам, во время которых проводились эксперименты с использованием СИ, длинные — различным остановкам комплекса.

В целях подготовки к выполнению следующих пунктов экспериментальной программы на высокой энергии ВЭПП-4М в мае 2018 г. и в ноябре 2019 г. были проведены тестовые заходы по получению светимости на энергии пучка 4,75 ГэВ, что соответствует энергии рождения основного состояния Υ -мезона. На меньших токах (8 на 6 мА в сгустках) была получена светимость $\sim 5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При получении токов в сгустках $\sim 20 \text{ мА}$ можно ожидать пиковую светимость $\sim 5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Во время тестового захода также изучалось влияние фона от синхротронного излучения в детекторе КЕДР. Как ожидалось, согласно расчетам, выше 3,5 ГэВ в пучке на вакуумную камеру внутри детектора начинает попадать жесткая компонента излучения из последнего поворотного магнита перед местом встречи. Для подавления этого эффекта в конструкции вакуумной камеры предусмотрены специальные подвижные водоохлаждаемые приемники излучения. Во время захода была произведена настройка положения этих приемников для подавления фона от СИ без уменьшения геометрической апертуры коллайдера.

1.2. Синхротронное излучение. Эксперименты с выведенными пучками синхротронного излучения [3, 4] для Сибирского центра терагерцевого и синхротронного излучения проводятся на накопителе ВЭПП-3 на энергиях 1,2 и 2 ГэВ, а на коллайдере ВЭПП-4М — на энергиях 1,9 и 4,5 ГэВ. В 2018 г. была освоена работа комплекса в любой комбинации этих режимов, в том числе и работа обеих установок на максимальной энергии. На ВЭПП-3 СИ выводится из поворотного магнита и 3-полусного вигглера (шифтера), а на ВЭПП-4М — из поворотного магнита и 9-полусного гибридного вигглера с полем 2 Тл. Данный вигглер был разработан и изготовлен в ИЯФ СО РАН в 2016 г. с целью повысить поток жестких фотонов [13, 14]. Летом 2017 г. новый вигглер был установлен на кольце ВЭПП-4М взамен старого 7-полусного вигглера с полем 1,2 Тл. Увеличить магнитное поле удалось за счет уменьшения межполусного зазора, а также с помощью использования постоянных магнитов, расположенных

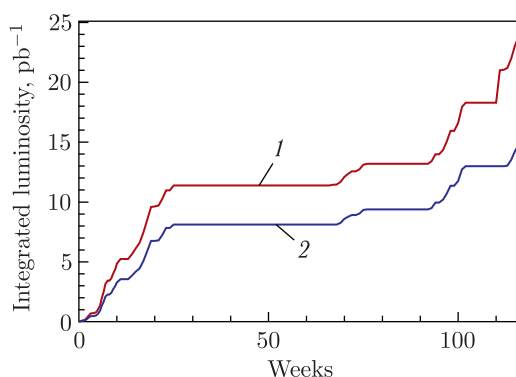


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Интеграл произведенной светимости (красная линия, 1) и записанной светимости (синяя линия, 2) при проведении эксперимента по изменению сечения рождения адронов 2,3–3,5 ГэВ

между полюсами, которые перераспределяют магнитный поток, в связи с чем вигглер и называется гибридным.

Спектры излучений из ВЭПП-3 и ВЭПП-4М показаны на рис. 3. Стоит отметить, что спектр синхротронного излучения из 9-полюсного гибридного вигглера является самым жестким в России.

В настоящее время на ВЭПП-3 используется 9 каналов вывода СИ, на которых оборудовано 9 станций, и еще 1 канал используется для стабилизации положения пучка электронов. На ВЭПП-4М работает 5 станций, использующих излучение из двух каналов вывода СИ. Полный список экспериментальных станций приведен в табл. 1.

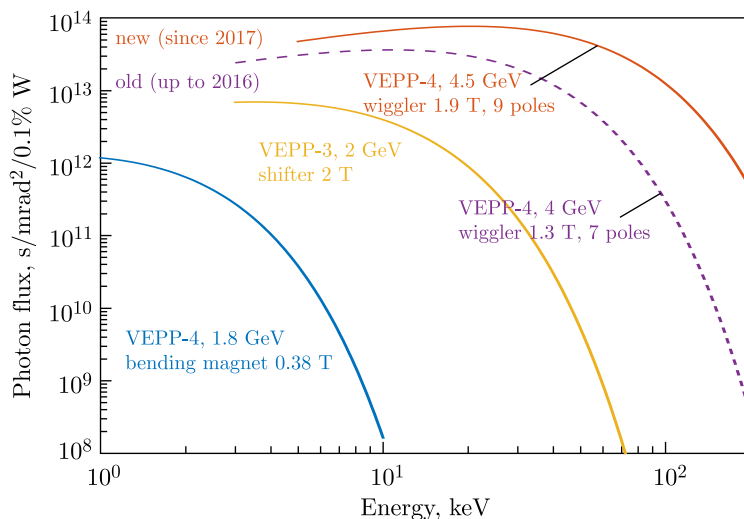


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Спектры разных источников излучения на ВЭПП-3 и ВЭПП-4М

Таблица 1. Станции СИ комплекса ВЭПП-4

№	ВЭПП-3	ВЭПП-4М
1	LIGA-технология и рентгеновская литография	Метрологические эксперименты
2	Быстрые динамические процессы	Фазовая контрастная микроскопия, микрофотография и жесткая рентгеновская флюоресценция
3	Прецизионная дифракция и аномальное рассеяние	Наносекундная спектроскопия для быстрых процессов
4	Рентгенофлюоресцентный анализ	Изучение материалов в экстремальных условиях
5	Дифракция высокого давления	Изучение материалов для термоядерного применения
6	Рентгеновская микроскопия и микрофотография	
7	Дифракция временного разрешения	
8	Люминесценция временного разрешения	
9	Прецизионная дифракция	

На ВЭПП-4 создаются еще два канала вывода СИ из поворотных магнитов, в одном из которых точка излучения будет лежать вне промежутка разведения пучков электронов и позитронов. Это позволит проводить эксперименты с СИ в режиме работы коллайдера со встречными пучками. Предполагается использовать этот канал, в том числе, в образовательных целях.

Для изучения быстропротекающих процессов на ВЭПП-4М был реализован 22-сгустковый режим (~ 50 нс между сгустками). Для инъекции использовалась схема с предударом, где в качестве предынфлектора служил позитронный инфлектор.

1.3. Установка «Дейтон». В 2018 г. на установке «Дейтон» [5], размещенной во втором прямолинейном промежутке ВЭПП-3, был проведен первый заход набора данных по измерению тензорной асимметрии в реакции фотодезинтеграции дейтрона с использованием системы мечения квазиреальных фотонов. В эксперименте электронный пучок с энергией 800 МэВ пересекал внутреннюю тензорно-поляризованную газовую дейтериевую мишень. При этом диапазон энергии гамма-квантов составил 400–640 МэВ. Для проведения эксперимента в промежуток ВЭПП-3 была установлена секция с 3 дополнительными дипольными магнитами и 2 квадрупольными линзами. Для эксперимента на 800 МэВ использовалась конфигурация с 1/2 детектора. Набран интеграл заряда 15 из 30 кКл. Следующий этап эксперимента намечен на 2020 г. после сборки детектора в полной конфигурации. Планируется добрать необходимую статистику на энергии электронов 800 МэВ и провести измерения на энергии пучка 1250 МэВ.

1.4. Выведенный пучок. Создание детекторов частиц для физики высоких энергий требует тестирования на пучках частиц. Для этих целей на накопителе ВЭПП-4М создан стенд «Выведенный пучок» [15] (рис. 4). Жесткие гамма-кванты рождаются при взаимодействии циркулирующего пучка электронов энергии 2–4 ГэВ с твердой мишенью, которая перемещается внутри вакуумной камеры накопителя вблизи места встречи. Рожденные гамма-кванты выводятся из вакуумной камеры поворотного магнита ВЭПП-4М в экспериментальный зал, где установлена мишень для рождения электрон-позитронных пар, спектрометр на основе поворотного магнита и детектирующая аппаратура. Пучок вторичных электронов имеет следующие параметры: энергия — 100–3000 МэВ, интенсивность — 100 Гц.

С 2011 г. на стенде «Выведенный пучок» проводились исследования по следующим тематикам.

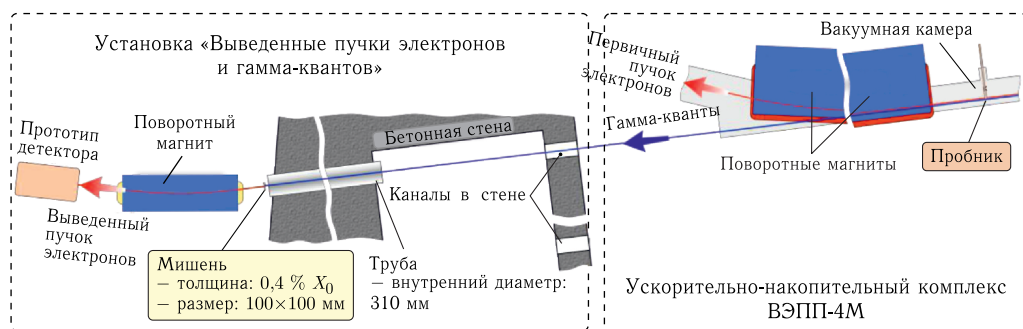


Рис. 4. Схема установки «Выведенный пучок»

- Разработка прототипа FARICH-детектора (FARICH — Focusing Aerogel Ring Cherenkov) [16]. FARICH-детекторы закладываются в основу системы идентификации детекторов для проектов Super-Charm-Tau-фабрика в ИЯФ СО РАН [17] и PANDA (FAIR, Германия).
- Калибровка координатных детекторов на основе GEM [18], используемых в ИЯФ СО РАН.
- Измерение временного разрешения и эффективности регистрации детекторов заряженных частиц на основе МКП [19]. Предполагается использование данных детекторов в торцевом калориметре детектора CMS на коллайдере LHC.

2. АБСОЛЮТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ ПУЧКА В ВЭПП-4М

Для абсолютной калибровки энергии частиц пучка применяется метод резонансной деполяризации (РД) [8]. Метод основан на зависимости частоты спиновой прецессии Ω от энергии пучка:

$$\Omega = \omega_0 \left(1 + \frac{E}{m_e c^2} \frac{\mu'}{\mu} \right),$$

где ω_0 — частота обращения; μ' , μ_0 — аномальная и нормальная части магнитного момента электрона. При воздействии на пучок переменным электромагнитным полем с частотой ω_d , удовлетворяющим условию $\Omega = n\omega_0 \pm \omega_d$ (n — целое число), происходит разрушение поляризации. Этот момент регистрируется при помощи подходящего метода измерения поляризации. На низких энергиях $E < 1,9$ ГэВ применяется поляриметр на основе внутрисгусткового рассеяния (тушековский поляриметр). В этой области энергии был выполнен ряд экспериментов по прецизионному измерению масс J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$, D^{\pm} , D^0 -мезонов, а также τ -лептона [10]. Калибровка энергии выше 1,9 ГэВ встречает ряд трудностей: отсутствие готового поляризованного пучка, а также снижение эффективности тушековского поляриметра [20].

2.1. Измерение в области выше энергии инжекции с пересечением спиновых резонансов. Применение метода РД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М в области низких энергий ограничено в основном областью 1,5–1,9 ГэВ [21]. Поляризация пучка происходит под действием радиационного механизма в накопителе ВЭПП-3 с характерным временем τ_p , обратно пропорциональным пятой степени энергии. Например, на энергии 1,85 ГэВ $\tau_p \approx 30$ мин, а на энергии 1,5 ГэВ — примерно 1,5 ч. Для полной поляризации требуется не менее $2,5\tau_p$. Поэтому ниже указанной области энергии получение поляризации обычным путем требует слишком больших временных затрат. В то же время перепуск готового поляризованного пучка с энергией выше 1,9 ГэВ из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М невозможен из-за ограничений полей импульсных элементов канала транспортировки.

Продвижение поляризационной программы за пределы диапазона 1,5–1,9 ГэВ в принципе осуществимо за счет ускорения/торможения поляризованного пучка в самом коллайдере после инжекции, но встает задача пересечения спиновых резонансов. К настоящему времени на ВЭПП-4М есть положительный опыт пересечения целого спинового резонанса на энергии 1763 МэВ [22] с помощью метода «частичной сибирской змейки» [23]. Для этого использовано продольное магнитное поле 0,6 Тл детек-

тора КЕДР с эффективной длиной 3,3 м при выключенных антисолоноидах и компенсации продольного поля при помощи скью-квадрупольей [24]. В данном эксперименте пересечение со скоростью изменения энергии $dE/dt = 2,4$ МэВ/с характеризуется как адиабатически медленное. За счет поворота спина вокруг вектора скорости в поле детектора происходит отстройка частоты спиновой прецессии от целого резонанса, которая в единицах энергии составляет примерно 22 МэВ. В этом случае основным источником частичной деполяризации пучка при ускорении (уменьшение на 20% от начальной) являются квантовые флуктуации в присутствии сильного возмущения в виде продольного магнитного поля.

Следующим важным этапом является изучение возможности пересечения на ВЭПП-4М спин-бетатронных резонансов типа $\nu \pm \nu_x = k_x$ и $\nu \pm \nu_y = k_y$. Здесь $\nu = \gamma a$ — частота прецессии спина в единицах частоты обращения частиц (γ — релятивистский фактор, $a = (g - 2)/2$ — аномальная часть гиромагнитного отношения электрона), ν_x и ν_y — частоты радиальных и вертикальных бетатронных колебаний. Примеры спиновых резонансов с бетатронными частотами $\nu_x = 7,54$, $\nu_y = 8,58$, расположенных между энергией инжекции 1887 МэВ и ближайшим целым спиновым резонансом $\nu = 5$, приведены в табл. 2.

Оценки показывают, что сдвиг спиновой частоты за счет основного поля детектора КЕДР недостаточно велик для того, чтобы обойти пересечение этих резонансов при энергиях выше 1,9 ГэВ. Сохранение поляризации без применения «частичной сибирской змейки» возможно в режиме «быстрого» пересечения резонанса при выполнении условия $d\varepsilon/dt \gg |w|^2 \omega_0$ [25, 26]. В левой части неравенства — скорость изменения отстройки от резонанса, определяемая темпом ускорения. В правой части w — комплексная амплитуда резонансной гармоники возмущений ведущего поля, ω_0 — круговая частота обращения частиц в кольце ускорителя $\omega_0 = 2\pi f_0$, где $f_0 = 818924$ Гц. В результате такого пересечения степень поляризации уменьшится на величину $D = \pi|w|^2 \omega_0 / (d\varepsilon/dt) \ll 1$.

Были проведены эксперименты по «быстрому» пересечению спин-бетатронных резонансов из табл. 2. Поляризованный пучок инжектировался на энергии 1886 МэВ. Пересечение резонансов 12 — ν_x и 13 — ν_y выполнено со скоростью 13 МэВ/с. Сначала поляризация была измерена на энергии инжекции, а затем после прохождения резонансов она была измерена на энергии 1983 МэВ. Измерения представляли со-

Таблица 2. Точки по энергии пучка ВЭПП-4М

Энергия, МэВ	Точки
1886	Инжекция поляризованного пучка
1933	Измерение энергии
1948	Резонанс $\nu = 13 - \nu_y$
1965	Резонанс $\nu = 12 - \nu_x$
1983	Измерение энергии
2001	Резонанс $\nu = \nu_x - 3$
2018	Резонанс $\nu = \nu_y - 4$
2147	Измерение энергии
2203	Резонанс $\nu = 5$

бой процедуру РД с использованием тушековского поляриметра [21]. Поляриметр сравнивает скорости счета электронов, испытавших внутрисгустковое рассеяние, из поляризованного f_{pol} и неполяризованного f_{unpol} сгустков при сканировании частоты деполаризатора, выполненного на основе полосковой линии. Наблюдаемый скачок в относительной скорости счета в момент совпадения этой частоты с частотой спинового резонанса свидетельствует о наличии поляризации в одном из сгустков. Величина скачка Δ пропорциональна квадрату степени поляризации. Рис. 5, б представляет результат наблюдения поляризации на энергии инжекции, а рис. 5, а — после пересечения резонансов. Из сравнения деполаризационных скачков Δ в первом и втором случаях следует, что уменьшение поляризации составило примерно $D \approx 1/2$. Оценка суммарной мощности спиновых резонансов согласно определению D при скорости изменения энергии 13 МэВ/с на ВЭПП-4М дает величину амплитуды $|w| \approx 3 \cdot 10^{-5}$. Ей отвечает критерий «быстроты» пересечения: $dE/dt = 13 \text{ МэВ/с} \gg 2 \text{ МэВ/с}$. При

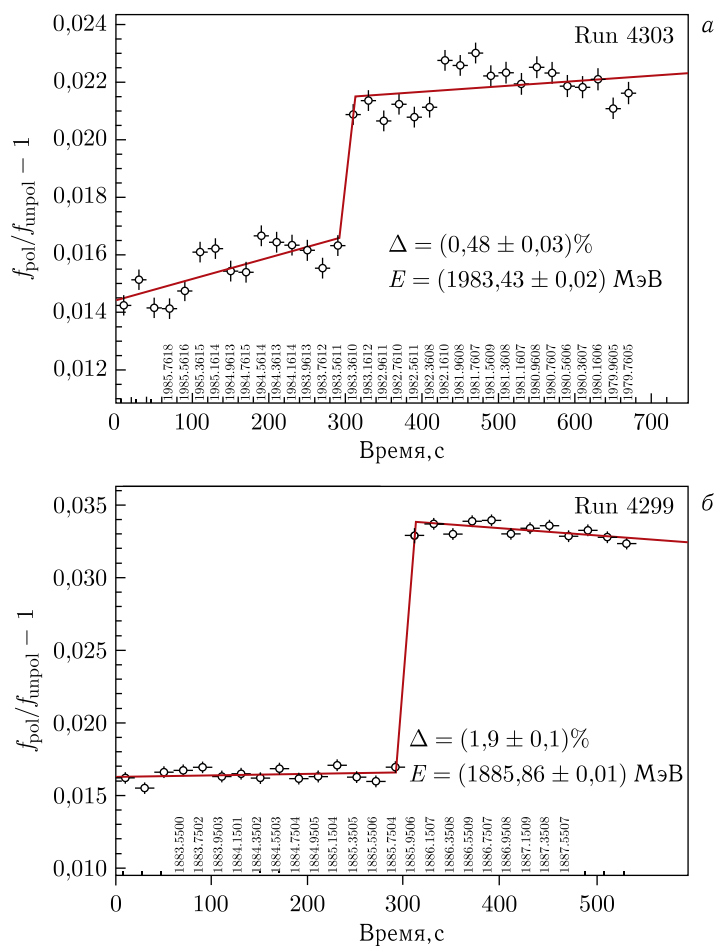


Рис. 5. Наблюдение поляризации в эксперименте по пересечению резонансов $12 - \nu_x$ и $13 - \nu_y$

ширине эффективного резонанса порядка $|w|$ его пересечение занимает по времени в нашем случае около 1 мс, что много меньше времени радиационного затухания $\tau_\gamma \sim 10^2$ мс в рассматриваемой области энергии ВЭПП-4М.

В этой связи отметим, что в стационарных условиях попадание на спиновый резонанс на частоте вертикальных бетатронных колебаний ν_y приводит к полной деполяризации за время порядка τ_γ . В теории это соответствует неограниченному росту фактора спинового отклика [27], который формируется за время τ_γ , усиливая прямой деполяризующий эффект различных поперечных возмущений ведущего поля за счет возбуждаемых ими вертикальных колебаний в кольце коллайдера. По-видимому, предпочтительными являются условия, когда эффективная область резонанса, определяемая без учета спинового отклика, пересекается за время, много меньшее τ_γ . В целом, пересечение резонанса $\nu \pm \nu_y = k_y$ является наиболее критичным по сравнению с другими спин-бетатронными резонансами. Например, такой резонанс не был успешно пересечен в эксперименте [28] на электронном кольцевом ускорителе ELSA в области энергии 2 ГэВ, несмотря на очень высокий темп ускорения — до 7 ГэВ/с. Теоретически, в ускорителе с периметром, более чем в 2 раза меньшим периметра ВЭПП-4М, это могло иметь место из-за невыполнения критерия «быстроты» при довольно большой амплитуде резонансной гармоники $|w| \sim 10^{-3}$. Необходимо учесть также в несколько раз меньшее время радиационного затухания в ELSA, что способствует более быстрому накоплению спиновых возмущений в области резонанса.

Эксперимент по комплексному пересечению совокупности резонансов $12 - \nu_x$, $13 - \nu_y$, $\nu_x - 3$ и $\nu_y - 4$ из табл. 2 с проверкой наличия поляризации на энергии 2147 МэВ показал отрицательный результат. Причем первая пара пересекалась со скоростью 13 МэВ/с, а вторая — 21 МэВ/с. Это может говорить о существенно большей суммарной мощности второй пары резонансов — с амплитудой $|w| \geq 10^{-4}$. В этом эксперименте, как и в успешном случае с резонансами $12 - \nu_x$ и $13 - \nu_y$, велось наблюдение за бетатронными частотами в процессе ускорения. Сравнительный анализ результатов этих наблюдений выявил тот факт, что при прохождении области энергии с резонансами $\nu_x - 3$ и $\nu_y - 4$ бетатронные частоты заметно сблизились, хотя и вышли на номинальные значения 0,54/0,58 к концу ускорения. Это могло усилить деполяризацию на резонансе $\nu_y - 4$ из-за увеличения вертикального эмиттанта на линейном разностном резонансе связи поперечных колебаний. Необходимо повторить эксперимент в других условиях. В одном варианте попробовать кратковременно увеличить темп ускорения в момент предполагаемого пересечения резонанса $\nu_y - 4$, не допуская значительных изменений в положении рабочей точки по бетатронным частотам. В другом варианте — применить известный метод импульсного изменения вертикальной бетатронной частоты при сохранении общего темпа ускорения.

2.2. Измерение на максимальной энергии ВЭПП-4М с лазерным поляриметром. При проведении экспериментов по прецизионному измерению масс и лептонных ширин Y -мезонов для калибровки энергии частиц пучка будет использоваться метод резонансной деполяризации с лазерным поляриметром [9], поскольку поляриметр на основе внутрисгусткового рассеяния для энергий выше 3 ГэВ обладает низкой эффективностью [20]. Принцип работы лазерного поляриметра основан на асимметрии обратного комптоновского рассеяния циркулярно поляризованного лазерного излуче-

ния на вертикально поляризованном электронном пучке [29]. Центры тяжести вертикальных координат рассеянных фотонов для левой и правой поляризации отличаются на величину

$$\Delta y = \frac{\hbar\omega_0}{m_e c^2} LP \approx 0,1 \text{ мм},$$

где ω_0 — частота лазерного излучения; P — степень вертикальной поляризации электронов; L — расстояние от места рассеяния до места регистрации.

В качестве источника лазерного излучения используется твердотельный Nd:YLF-лазер с диодной накачкой, имеющей среднюю мощность 2 Вт, частоту повторения импульсов до 4 кГц и длительность импульса 5 нс. Поляризация лазерного излучения управляется при помощи КД*Р ячейки Поккельса с полуволновым напряжением 3,1 кВ. Переключение между левой и правой циркулярными поляризациями лазерного излучения может осуществляться с частотой до 4 кГц. Кроме того, реализован режим случайной циркулярной поляризации для каждого лазерного импульса. Такой режим позволяет исключить ложный эффект, связанный с совпадением частоты переключения лазера с частотой возможных колебаний орбиты электронного пучка или частотой возможных нестабильностей элементов оптической системы. Далее циркулярно поляризованный лазерный луч при помощи экспандера и подвижного зеркала фокусируется и нацеливается на электронном пучке. Место встречи лазерного и электронного пучков расположено в прямолинейном экспериментальном промежутке ВЭПП-4М по ходу электронного пучка сразу после квадрупольных линз финального фокуса до поворотных магнитов, где угловой разброс импульсов в пучке минимален (рис. 6). Из двух таких мест встречи выбрано ближнее к лазеру, как наиболее удобное для фокусировки.

Рассеянные гамма-кванты регистрируются двухкоординатным детектором на основе GEM [30] на расстоянии около 30 м от места рассеяния. В качестве конвертера комптоновских гамма-квантов в заряженные частицы используется свинцовая пластина толщиной 12 мм, что составляет около двух радиационных длин и является оптимумом для регистрации эффекта.

С использованием лазерного поляриметра выполнены калибровки энергии (рис. 7) методом резонансной деполаризации на энергии 4,1 ГэВ. Наблюдается процесс радиационной поляризации Соколова–Тернова, деполаризация (калибровка энергии), снова

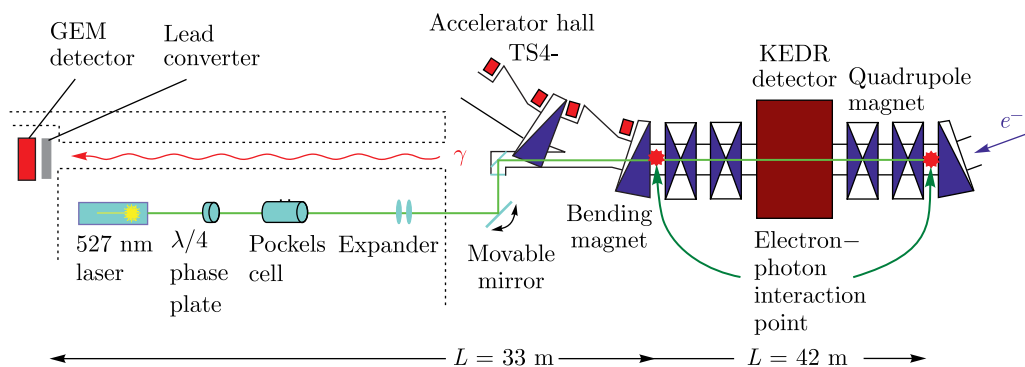


Рис. 6. Схема лазерного поляриметра

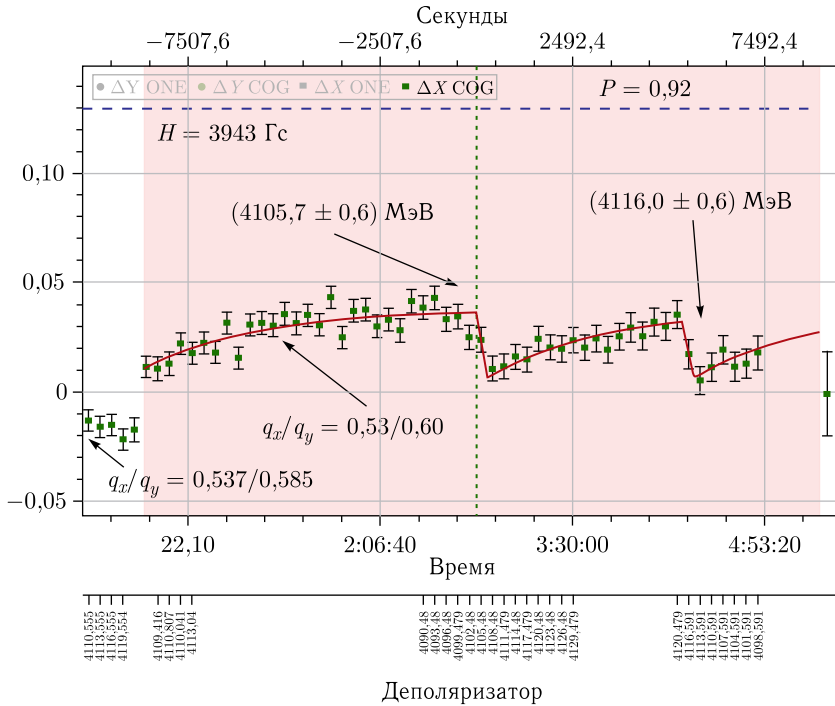


Рис. 7. Калибровка энергии методом МРД с использованием лазерного поляриметра

процесс радиационной поляризации и повторная калибровка. Сканирование деполяризатором осуществлялось со скоростью 10 кэВ/с в диапазоне энергии от 40 МэВ и более, что заведомо покрывало неопределенность энергии частиц пучка. Повторная калибровка проводилась с противоположным направлением сканирования с целью определения деполяризации на боковых спиновых резонансах. В данном случае деполяризация в обоих случаях произошла на боковых синхротронных резонансах. Для дальнейших калибровок энергии необходимо снизить силу воздействия деполяризатора на пучок.

В настоящее время ведется подготовка к калибровке энергии в области $Y(1S)$ -резонанса ($E = 4,73$ ГэВ). Основные трудности заключаются в следующем. Во-первых, получение режима с поляризацией. Деполяризующие факторы такие, как вертикальные искажения орбиты и ошибки выставки квадруполей, уменьшают как степень, так и время радиационной поляризации, что затрудняет ее измерение. Во-вторых, низкая интенсивность комптоновского рассеяния (~ 2 кГц/мА) на порядок меньше расчетной величины. Как показали последние измерения, основная причина этого расхождения заключается в температурных деформациях зеркала, помещенного в вакуумную камеру, от нагрева синхротронным излучением, что приводит к дефокусировке лазерного пучка. В настоящее время изготавливается новый узел ввода лазерного излучения в вакуумную камеру, где будет использоваться охлаждаемое водой медное зеркало.

3. ИСКАЖЕНИЕ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ ВСЛЕДСТВИЕ ВЛИЯНИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В однокольцевом коллайдере ВЭПП-4М электроны и позитроны циркулируют в одних и тех же магнитах, но по принципиально разным орбитам вследствие эффекта Saw-tooth [31], который обусловлен азимутальной зависимостью потерь энергии на синхротронное излучение. Изучение этого различия важно, так как оно может влиять на точность прецизионных экспериментов. Например, планируемая с учетом накопленного на ВЭПП-4М опыта точность сравнения частот прецессии спина электрона и позитрона с целью проверки СРТ-инвариантности составляет $5 \cdot 10^{-9}$ [32]. Орбиты электронов и позитронов расходятся друг с другом зеркально симметричным образом, если магнитная структура и расположение резонаторов отвечают принципу зеркальной симметрии. В этом случае имеющееся разведение орбит не приводит к относительному сдвигу спиновых частот электронов и позитронов. Нарушение зеркальной симметрии накопителя ведет к отклонению формы орбит Saw-tooth от идеальной орбиты и к появлению систематической ошибки при сравнении спиновых частот, которые зависят от интеграла магнитного поля вдоль орбиты. В этой связи возникают высокие требования к системе измерения положения орбиты пучков.

На ВЭПП-4М был проведен эксперимент [33] по параллельному мониторингу орбит электронного и позитронного пучков. По разности их радиальных орбит измеряется орбита Saw-tooth. Разность орбит не зависит от ошибок задания геометрических «нулей» пикапов, а также нестабильности магнитных возмущений из-за колебаний температуры окружающей среды или тока в источниках питания, поэтому такой способ является наиболее точным. Возможность для проведения этого эксперимента появилась после запуска новой системы измерения поперечного положения пучка, включающей 54 пикап-станции, способных измерять положение для каждого сгустка на каждом обороте [34]. Эксперимент по наблюдению орбиты Saw-tooth был поставлен на сравнительно высокой энергии 4,1 ГэВ, чтобы увеличить соответствующую величину искажений, пропорциональную кубу энергии. Измерение велось в течение 5 ч на двух несменяемых циркулирующих парах сгустков электронов и позитронов (режим 2×2). В каждой одноименной паре сгустки разнесены на половину оборота. Разноименные сгустки в сопряженных парах встречались только в основном месте встречи IPO в детекторе КЕДР. В паразитных местах встречи (IP1, IP2, IP3) осуществлялось электростатическое разведение орбит электронов и позитронов по вертикали. Разброс ежесекундных показаний был в пределах 30–40 мкм, что при усреднении за 1 ч давало ошибку в положении орбиты порядка 1 мкм.

Азимутальное распределение отклонений орбиты Saw-tooth, измеренное по разности орбит в одной из электрон-позитронных пар, показано в сравнении с теоретическим на рис. 8. Это сравнение, а также сравнение по другим парам показывает, что наблюдаемые возмущения хорошо соответствуют расчетным данным по фазе колебаний. В то же время, несмотря на близость отклонений по величине в целом, имеются участки, где различие становится значительным. Например, это относится к области места встречи IPO. Основные причины: эхо-сигналы, генерируемые сгустками на неоднородностях вакуумной камеры; «хвост» сигнала от встречного сгустка на пикап-станциях вблизи мест встречи — наводка возрастает в сигнале, генерируемом более поздним сгустком; особенность конструкции электродов в отдельных пикапах, дела-

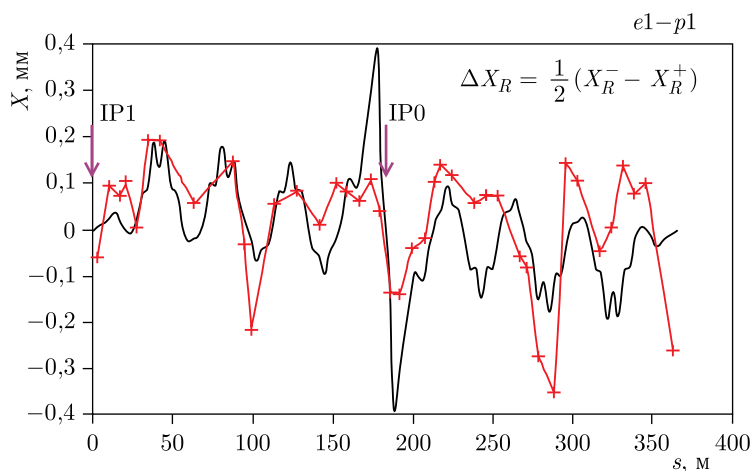


Рис. 8. Орбита Saw-tooth — теоретическая (кривая без точек) и измеренная по разности ΔX_R радиальных орбит электронов и позитронов в одной из сопряженных пар ($e1-p1$). IP0 — основное место встречи в детекторе КЕДР; IP1 — место встречи в техническом промежутке

ющая их чувствительными к знаку направления движения пучка. Для минимизации эффекта «хвостов» на участках с местами встречи, необходимо провести подобный эксперимент в режиме 1×1 в двух дополняющих друг друга случаях: со встречей в IP0 и IP1 и со встречей в IP2 и IP3.

Интересно отметить, что в линзах финального фокуса орбиты электронов и позитронов из-за эффекта Saw-tooth отстоят друг от друга по радиусу на заметное расстояние. Например, на энергии 4,73 ГэВ ($Y(1S)$ -резонанс) оно в расчете достигает 1 мм, чему соответствуют угол пересечения встречных пучков $2,23 \cdot 10^{-4}$ рад и относительный сдвиг энергии в системе центра масс 10^{-8} .

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ВЭПП-4

Подготовка к проведению экспериментов на коллайдере ВЭПП-4М на максимальной энергии, а также старение и износ оборудования требуют существенной модернизации многих систем. В 2016 г. был осуществлен переход на новый инжекционный комплекс [6], что увеличило максимальную скорость накопления позитронов с 50 до 500 мкА/с, а также подняло энергию инжекции в ВЭПП-3 с 350 до 400 МэВ. Последнее положительно повлияло на ускорение пучков высокой интенсивности в ВЭПП-3.

Увеличение энергии и интенсивности пучков в ВЭПП-4М потребовало модернизации ВЧ-системы накопителя ВЭПП-4М, работающей на частоте 180 МГц. В ходе модернизации была осуществлена замена предварительных каскадов (1–4), работающих на триодах ГИ-50 и тетроре ГУ-92А, на новый полупроводниковый ВЧ-усилитель, а также подключен шестой выходной каскад, в котором используется четыре тетрора ГУ-101А. Полупроводниковый ВЧ-усилитель по договору изготовлен

в ООО «НПП Триада ТВ» (Новосибирск). Усилитель выполнен по схеме сложения мощностей двух усилительных модулей на LD-MOS транзисторах (мощность каждого — 12 кВт), которые являются источником сигнала для двух ламп ГУ-101А пятого предвыходного каскада. После модернизации ВЧ-генератора была получена выходная мощность ВЧ 400 кВт, что в два раза превышает параметры предыдущего варианта системы, а максимальное напряжение ВЧ, развиваемое на резонаторах, возросло с 2 до 4 МВ. Это позволит ускорять в коллайдере ВЭПП-4М ток пучка 100 мА до энергии 4,75 ГэВ.

В настоящее время готовится переход на новые мощные тиристорные источники тока для питания основных магнитных элементов накопителя ВЭПП-3 (15 кА, 40 В) и коллайдера ВЭПП-4М (7,5 кА, 70 В) со стабильностью выходного тока лучше чем 10^{-5} . Оба источника изготовлены по одной технологии. Для управления источниками питания разработан прецизионный контроллер, имеющий высокоточный ЦАП и несколько точных измерительных каналов, которые синхронизируются внешней тактовой частотой, что обеспечивает точную синхронную обработку и измерение выходного тока. Контроллер имеет интерфейс Ethernet, программное обеспечение разработано на базе EPICS.

Кроме того, ведется разработка линейки источников питания с относительной стабильностью $\sim 10^{-4}$ для элементов слаботочной коррекции. Предполагается каждый источник питания снабдить универсальным контроллером с интерфейсом Ethernet для управления и измерения основных параметров (ток, напряжение, температура внутри источника).

Для обеспечения работоспособности системы электростатического разведения коллайдера ВЭПП-4М на высоких энергиях (3–6 ГэВ) была проведена замена источников высоковольтного напряжения северного полукольца: были установлены два источника положительной и два — отрицательной полярности. Старые источники не обеспечивали работу на энергии выше 3 ГэВ: наблюдалась просадка рабочего напряжения по причине появления токов эмиссии с пластин на стенку вакуумной камеры или на приемники синхротронного излучения при пролете циркулирующих электрон-позитронных пучков. Старые источники питания не рассчитаны на выходной ток более 1 мА, хотя обладают высокой стабильностью напряжения, что требовалось для проведения прецизионных экспериментов по измерению масс частиц на низкой энергии ВЭПП-4М. В ИЯФ СО РАН были разработаны новые высоковольтные источники напряжения с током до 10 мА и с возможностью быстрого (~ 1 мс) подъема и снятия полного напряжения. Данная возможность позволяет проводить эксперименты с использованием СИ в режиме так называемого «быстрого затвора», когда излучение быстро подается или снимается с исследуемого объекта. Предполагается, что новые высоковольтные источники будут управляться от тех же контроллеров, которые используются для источников питания магнитной системы. В настоящее время изготавливаются высоковольтные источники для замены оставшихся генераторов.

За последние годы на комплексе ВЭПП-4 была полностью модернизирована диагностика пучков. На накопителе ВЭПП-3 и коллайдере ВЭПП-4М была введена в эксплуатацию электроника системы поперечного положения орбиты пучка [34]. Особенностью новых пикап-станций ВЭПП-4М является возможность измерений координат положения орбит и токов сгустков при одновременной циркуляции двух сгустков электронов и двух сгустков позитронов, а также возможность выполнения пооборо-

ных измерений после инъекции или удара кикерами и пооборотных измерений до сброса тока (функция «время назад»). Возбуждение когерентных колебаний сгустка частиц с помощью вертикального и горизонтального кикеров [35] позволяет выполнять измерения параметров линейной (бетатронные частоты, бета-функции, набег фаз между пикапами) и нелинейной оптики (хроматизм и нелинейности бетатронных частот и бета-функций, размер динамической апертуры) и на основе этих измерений осуществлять коррекцию оптики.

Разработана и запущена в эксплуатацию электроника для измерения продольного распределения тока пучка. В стадии запуска новая система измерения полного тока пучка. На канале транспортировки частиц ВЭПП-3–ВЭПП-4М модернизирована система измерения поперечного положения пучка, включая установку новых полосковых датчиков и пикап-станций [36, 37], а также внедрение новой электроники для системы измерения поперечного профиля пучка на основе люминорных датчиков [37]. Программное обеспечение всей новой электроники диагностики пучка разработано на базе EPICS.

Система оптической диагностики пучка на ВЭПП-3 и ВЭПП-4М [38] оборудована ПЗС-матрицами и видеокамерами для контроля за поперечным распределением пучков в режиме реального времени, Ф-диссектором для наблюдения за продольным распределением отдельных сгустков. На «электронной» части оптической диагностики ВЭПП-4М действует также профилометр на основе многоанодного ФЭУ, позволяющий получать информацию о поведении поперечного профиля пучка с однооборотным временным разрешением и измерять спектр когерентных колебаний сгустка [39]. В последнее время используется переносная Streak-камера для пооборотных измерений продольного распределения пучка.

Для обеспечения более точного мониторинга энергии частиц модернизирована система измерения на основе ЯМР магнитных полей в магнитах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М [12]. Установлен многоканальный магнитометр, с помощью которого путем последовательного перебора осуществляются измерения в магнитах коллайдера ВЭПП-4 (калибровочный магнит и два магнита-спектрометра системы рассеянных электронов), а также в калибровочном магните накопителя ВЭПП-3. Точность измерений поля $\sim 10^{-6}$. Разработана и изготовлена электроника для измерения импульсных магнитных полей в импульсных магнитах канала ВЭПП-3–ВЭПП-4М.

Проводится модернизация системы управления комплекса ВЭПП-4: осуществляется постепенный переход с аппаратуры в стандарте САМАС, разработанной в 1980-х гг., на новые специализированные интеллектуальные контроллеры, интегрированные непосредственно в источники питания или генераторы, а также внедряются новые системы на базе промышленной электроники (PLC). Контроллеры подключаются к внутренней сети комплекса Ethernet. Ядро системы управления составляют серверные станции, в которых запущены виртуальные машины, работающие под управлением Linux. Программное обеспечение для взаимодействия с аппаратурой разрабатывается с использованием платформы EPICS. Разрабатывается новая система синхронизации, которая позволит обеспечить согласованную работу всех новых устройств: обеспечить синхронную обработку заданий и выполнение измерений при ускорении пучка.

Стоит отметить, что модернизация оборудования комплекса и внедрение новых устройств выполняется в процессе работы комплекса, без длительных остановок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускорительный комплекс ВЭПП-4 продолжает функционировать. Начаты эксперименты по ФЭЧ на детекторе КЕДР в максимальном диапазоне энергий коллайдера ВЭПП-4М. Завершен первый пункт этой экспериментальной программы — измерение сечения рождения адронов в диапазоне энергий пучков от 2,3 до 3,5 ГэВ. Ключевой особенностью коллайдера ВЭПП-4М является возможность абсолютного измерения энергии сталкивающихся частиц с высокой точностью. В настоящее время продолжается развитие метода резонансной деполаризации с помощью лазерного поляриметра для измерения энергии выше 3,5 ГэВ. Для измерения энергии выше инжекции в ВЭПП-4М (до 2,3 ГэВ) предлагается использовать тушековский поляриметр с поляризацией пучка в ВЭПП-3 и последующим ускорением поляризованных частиц непосредственно в ВЭПП-4М с адиабатическим пересечением спиновых резонансов.

Проводятся регулярные заходы с синхротронным излучением для Сибирского центра терагерцевого и синхротронного излучения, а также с жесткими гамма-квантами для тестирования аппаратуры на стенде «Выведенный пучок». На установке «Дейтон» начат эксперимент по измерению тензорной асимметрии в реакции фотодезинтеграции дейтрона.

Модернизация оборудования на комплексе ВЭПП-4 осуществляется параллельно с работой установок на экспериментальные программы. Опыт разработки и эксплуатации новых систем предполагается использовать для создания будущих ускорительных установок (источник СИ СКИФ, Супер-чарм-тау фабрика и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levichev E. B.* Status and Upgrade of the VEPP-4 Storage-Ring Facility // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13, No. 7. P. 876–883.
2. *Anashin V. V. et al.* The KEDR Detector // *Phys. Part. Nucl.* 2013. V. 44, No. 4. P. 657–702.
3. *Piminov P. A. et al.* Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 // *Phys. Procedia.* 2016. V. 84. P. 19–26.
4. *Баранов Г. и др.* Эксперименты с синхротронным излучением на ВЭПП-4М // *Поверхность.* 2020. Т. 2. С. 34.
5. *Nikolenko D. M.* Experiments with Internal Targets at the VEPP-3 Electron Storage Ring // *Phys. Atom. Nucl.* 2010. V. 73, No. 8. P. 1322–1338.
6. *Andrianov A. et al.* Status and Prospects of VEPP-5 Injection Complex // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 7. P. 720–723.
7. *Дементьев Е. Н. и др.* Запуск систем обратной связи на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // *Письма в ЭЧАЯ.* 2010. Т. 7, № 7(163). С. 843.
8. *Blinov V. E. et al.* High Precision Energy Calibration with Resonant Depolarization at the VEPP-4M Collider // *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2016. V. 273–275. P. 210–218.
9. *Blinov V. E. et al.* Laser Polarimeter at VEPP-4M // *J. Instrum.* 2017. V. 12. P. 08020.
10. *Левичев Е. и др.* Прецизионное измерение масс элементарных частиц на коллайдере ВЭПП-4М с детектором «Кедр» // *УФН.* 2014. Т. 184, № 1. С. 75–88.
11. *Anashin V. V. et al.* Measurement of R at KEDR // *Nucl. Part. Phys.* 2015. V. 260. P. 85–86.
12. *Karpov G.* Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Magnetometer // *Optoelectron. Instrum. Data Proces.* 2015. V. 51. P. 58–63.
13. *Baranov G. et al.* Hybrid Magnet Wiggler for SR Research Program at VEPP-4M // *Phys. Procedia.* 2016. V. 84. P. 126–130.

14. *Baranov G. et al.* Design and Magnetic Measurements of a Hybrid Wiggler for SR Research Program at VEPP-4 // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. V. 28, No. 3.
15. *Bobrovnikov V. S. et al.* Extracted Electron and Gamma Beams in BINP // J. Instrum. 2014. V. 9. P. C08022.
16. *Barnyakov A. Yu. et al.* Tests of FARICH Prototype with Precise Photon Position Detection // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 88–91.
17. *Piminov P.* Project for a Super Charm-Tau Factory at BINP // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15. P. 732–736.
18. *Shekhtman L. I. et al.* Development of High Resolution Tracking Detectors with Gas Electron Multipliers // J. Instrum. 2014. V. 9. P. C08017.
19. *Brianza L. et al.* Response of Microchannel Plates to Single Particles and to Electromagnetic Showers // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 57858. P. 216–221.
20. *Никитин С. А., Николаев И. Б.* Расчет интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М // ЖЭТФ. 2012. Т. 142, № 1. С. 44–45.
21. *Blinov V. E. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 23.
22. *Barladyan A. et al.* // Phys. Accel. Beams. 2019. V. 22. P. 112804.
23. *Derbenev Ya. S. et al.* // Proc. of the 10th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Serpukhov, 1977. P. 76–80.
24. *Никитин С. А., Протопопов И. Я.* Препринт ИЯФ 99-44. Новосибирск, 1999.
25. *Froissart M., Stora R.* // Nucl. Instr. Meth. 1960. V. 7. P. 297.
26. *Derbenev Ya., Kondratenko A.* // Dokl. AN SSSR. 1974. V. 217. P. 311.
27. *Derbenev Ya., Kondratenko A., Skrinsky A.* // Part. Accel. 1979. V. 9. P. 247.
28. *Nakamura S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 411. P. 93.
29. *Байер В. Н., Хозе В. А.* Об определении поперечной поляризации электронов большой энергии // ЯФ. 1969. Т. 9. С. 409.
30. *Kudryavtsev V. N. et al.* The Triple-GEM Detector for a Laser Polarimeter Facility at VEPP-4M Collider // Proc. of MicroPattern Gaseous Detectors Conf. (MPGD-2019), May 5–10, 2019.
31. Handbook of Accelerator Physics and Engineering / Eds.: A. W. Chao, K. H. Mess, M. Tigner, F. Zimmermann. World Scientific, Singapore, 2013.
32. *Blinov V. et al.* Study of the Possibility of Increasing the Accuracy of CPT Invariance Test at Electron-Positron Storage Rings // ICFA BD Newslett. 2009. No. 48. P. 207–217.
33. *Bekhtenev E. et al.* Observation of Saw-Tooth Effect Orbit at VEPP-4M Collider // IPAC-2018-FRXGBD4. 2018.
34. *Бехтенов Е. А., Карнов Г. В., Пиминов П. А.* Система измерения положения пучка в электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // ПТЭ. 2017. № 5. С. 74–80.
35. *Anchugov O. et al.* The Coherent Particle-Oscillation Excitation System at the VEPP-4M Collider // Instr. Exp. Tech. 2019. V. 62. P. 599–608.
36. *Bekhtenev E. A. et al.* A New System for Measuring the Beam Position in the Electron-Positron Transport Channel from the VEPP-3 Storage Ring to the VEPP-4M Collider // Instr. Exp. Tech. 2020. V. 63, No. 1. P. 13–18.
37. *Бехтенов Е. А. и др.* Модернизация системы диагностики пучка в импульсном транспортном канале ВЭПП-3–ВЭПП-4М // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 649–658.
38. *Meshkov O. I. et al.* New Optical Diagnostics of the VEPP-4M Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5, No. 7. P. 53–56.
39. *Vogomyagkov A. et al.* New Fast Beam Profile Monitor for Electron-Positron Colliders // Rev. Sci. Instr. 2007. V. 78, Iss. 4. P. 043305.