

СТАТУС ВЭПП-4

*В. Е. Блинов^а, В. С. Бобровников^а, К. В. Золотарев^{а,б},
В. А. Киселев^а, С. А. Кононов^{а,б}, Г. Я. Куркин^а,
Е. Б. Левичев^а, О. И. Мешков^{а,б}, Н. Ю. Мучной^{а,б},
С. А. Никитин^{а, 1}, Д. М. Николенко^а, Д. П. Суханов^{а,б},
Ю. А. Тихонов^а, Б. П. Толочко^а, Г. М. Тумайкин^а,
А. Г. Шамов^а, Д. Н. Шатилов^а*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-4 предназначен для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками с энергиями 1–5 ГэВ на коллайдере ВЭПП-4М с магнитным детектором КЕДР. Эксперименты по ФВЭ на комплексе в его современном виде проводятся начиная с 2002 г. Помимо ФВЭ на ВЭПП-4 выполняются научные программы, включающие эксперименты с пучками СИ, по ядерной физике на внутренней газовой мишени, по проверке СРТ-инвариантности, по ускорительной физике и др. В настоящей работе описаны статус комплекса, основные результаты, используемые методики, новые подходы и перспективные планы.

Accelerator-storage complex VEPP-4 is designed for the experiments with colliding electron-positron beams of the 1–5 GeV energy at the VEPP-4M collider with the magnetic detector KEDR. HEP experiments at the complex in its present form have been conducted since 2002. Besides the HEP programs, the other scientific ones are performed at VEPP-4 too, including the SR experiments, the nuclear physics with the internal polarized gas target, the CPT-invariance test, the accelerator physics, etc. Status of the complex, the main results, methods used, new approaches and perspective plans are described.

PACS: 29.20-c; 41.75.Fr; 41.75.Ht; 13.66.Bc; 13.66.De

ВВЕДЕНИЕ

Первый циркулирующий пучок в коллайдере ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4 был получен в 1977 г. В настоящее время комплекс [1] включает в себя инжектор «Позитрон», бустерный накопитель ВЭПП-3 (энергия пучка от 350 МэВ до 2 ГэВ), электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М с энергиями пучков $E = 0,9–5,5$ ГэВ, универсальный магнитный детектор КЕДР [2] (рис. 1). В экспериментальном промежутке коллайдера кроме детектора КЕДР находятся система регистрации рассеянных электронов и позитронов для двухфотонной физики, а также оборудование для экспериментов

¹E-mail: S.A.Nikitin@inp.nsk.su

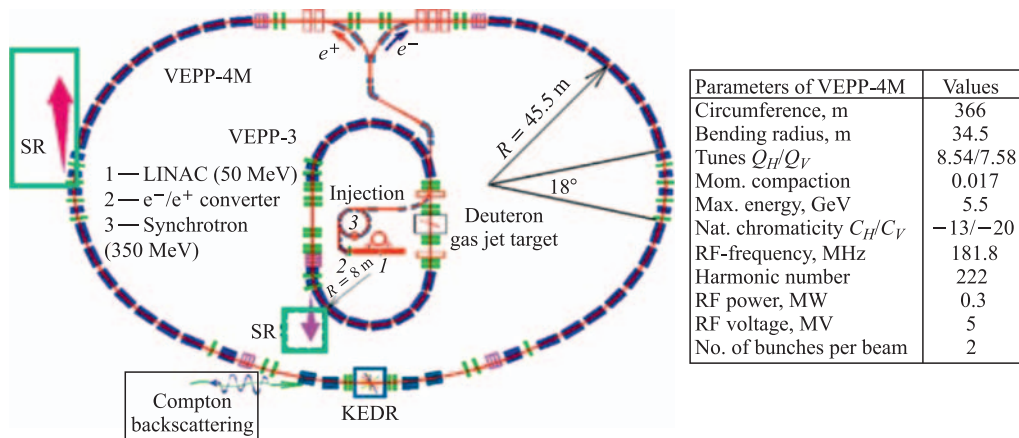


Рис. 1. Схема комплекса ВЭПП-4 и основные параметры коллайдера ВЭПП-4М

с обратным комптоновским рассеянием и выведенным пучком гамма-излучения, получаемым на конвертере. В кольце ВЭПП-4М расположены элементы, позволяющие проводить прецизионные поляризационные эксперименты. Установки ВЭПП-3 и ВЭПП-4М оснащены пользовательскими станциями для экспериментов на выведенных пучках СИ. На ВЭПП-3 действует установка «Деитрон» с внутренней поляризованной газовой мишенью для экспериментов по физике ядра. Некоторые физико-технические характеристики комплекса позволяют осуществлять постановку экспериментов, уникальных не только для России, но и на мировом уровне.

1. ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Светимость коллайдера ВЭПП-4М существенно ниже, чем коллайдеров нового поколения (В-фабрики). По этой причине физическая программа КЕДР направлена на прецизионное измерение параметров элементарных частиц. При этом используются следующие преимущества: большой диапазон по энергии в системе центра масс ($2E = 2-10$ ГэВ); развитые методы и техника прецизионного измерения энергии пучка; хорошее энергетическое и пространственное разрешение в ЛКг-калориметре (3,5 % и 1 мм, $E = 1,8$ ГэВ); высокое разрешение в системе рассеянных электронов (10^{-2}). На комплексе ВЭПП-4/КЕДР доступны следующие эксперименты по ФВЭ: спектроскопия $c\bar{c}$ - и $b\bar{b}$ -состояний, включая прецизионное измерение масс элементарных частиц (из ψ - и Υ -семейств, D -мезонов), а также лептонных и полных ширин узких резонансов (Γ_{ee} , Γ_{tot}); измерение массы тау-лептона по пороговому поведению сечения рождения (вблизи $E = 1777$ МэВ); уникальное измерение на одной установке в широкой области энергии $2E = 2-10$ ГэВ фундаментального параметра R ; изучение двухфотонной физики (полное сечение процесса $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны, зарядово-четные состояния).

За все годы работы комплекса, начиная с 1980 г., на нем были измерены массы целого ряда элементарных частиц [3]. Точное знание масс частиц необходимо для проверки теоретических моделей. Эти данные представляют собой прецизионные реперы на фундаментальной шкале масс. Кроме того, они используются для абсолютной калибровки шкалы энергии произвольного коллайдера в различных экспериментах, а также измерений импульса в координатных системах детекторов.

В 2004–2010 гг. были проведены следующие эксперименты с детектором КЕДР [4–11]: с лучшей в мире точностью измерены массы J/ψ -, $\psi(2S)$ -, $\psi(3770)$ -, D -мезонов, а также

Таблица 1. Частицы, масса которых измерена с наилучшей точностью

| Частица | $\Delta M/M$ (PDG) |
|-------------|---------------------|
| p | $0,1 \cdot 10^{-6}$ |
| n | $0,1 \cdot 10^{-6}$ |
| e | $0,1 \cdot 10^{-6}$ |
| m | $0,1 \cdot 10^{-6}$ |
| π^{\pm} | $2,5 \cdot 10^{-6}$ |
| ψ' | $3,0 \cdot 10^{-6}$ |
| J/ψ | $3,5 \cdot 10^{-6}$ |
| π^0 | $4,5 \cdot 10^{-6}$ |

тау-лептона; измерена вероятность распада $J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma$, измерено произведение лептонных ширин J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов на вероятности распада в e^+e^- и $\mu^+\mu^-$; измерены параметры $\psi(3770)$; проверена $e-\mu$ -универсальность в распадах J/ψ .

Точность измерения масс очарованных мезонов J/ψ , $\psi(2S)$ с детектором КЕДР была улучшена в несколько раз по сравнению с табличной. В соответствии с данными Particle Data Group эти частицы на основе наших новых измерений можно разместить в верхних строчках таблицы точности знания масс элементарных частиц (см. табл. 1). Измерение массы тау-лептона с детектором КЕДР позволило улучшить точность проверки принципа лептонной универсальности в Стандартной модели.

После остановки на ремонт и модернизацию детектор КЕДР будет готов к началу нового цикла экспериментов. В 2014 г. запланировано: сканирование в области $2E = 3,1-4,0$ ГэВ для измерения R ; набор статистики в пике $\psi(3770)$ -мезона для измерения масс D -мезонов.

2. РЕЗОНАНСНАЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ

Методическое обеспечение физических экспериментов на ВЭПП-4 поддерживается на высоком уровне. На ВЭПП-4 получил дальнейшее развитие самый точный метод абсолютного измерения средней энергии частиц в пучке, движущемся в электрон/позитронном накопителе. Метод резонансной деполяризации (РД) впервые предложен в ИЯФ в 1968 г. С его использованием выполнены эксперименты по измерению масс элементарных частиц. В основе метода лежит измерение частоты прецессии спина электрона в ведущем поле. Деполяризация достигается при введении внешнего э.м. поля с частотой спинового резонанса. В нашем случае поле создается парой согласованных полосковых линий, разнесенных по вертикали и подключенных к ВЧ-генератору, частота которого сканируется с нужным темпом. Факт деполяризации регистрируется по скачку в скорости счета электронов, испытавших внутрисгустковое (или тушековское) рассеяние. Поляризация электронного (или позитронного) пучка осуществляется в накопителе ВЭПП-3 за счет радиационного механизма Соколова–Тернова. Характерное время поляризации на 1,8 ГэВ — полчаса. Затем пучок перепускается в коллайдер, где поляризация и применяется для калибровки энергии. Для уменьшения систематической ошибки применяется компенсационная методика. Скорость счета рассеянных электронов из поляризованного сгустка, регистрируемых системой сцинтилляционных счетчиков, нормируется на скорость счета частиц из неполяризованного сгустка. На рис. 2, а показан процесс сканирования с деполяризационным скачком. Точность абсолютной калибровки энергии в наших, ставших уже рутинными, измерениях составляет рекордное значение 10^{-6} [12]. Для сравнения разброс спиновых частот в пучке на ВЭПП-4М равен примерно $5 \cdot 10^{-7}$, а предельная точность метода 10^{-7} (точность знания мировых констант).

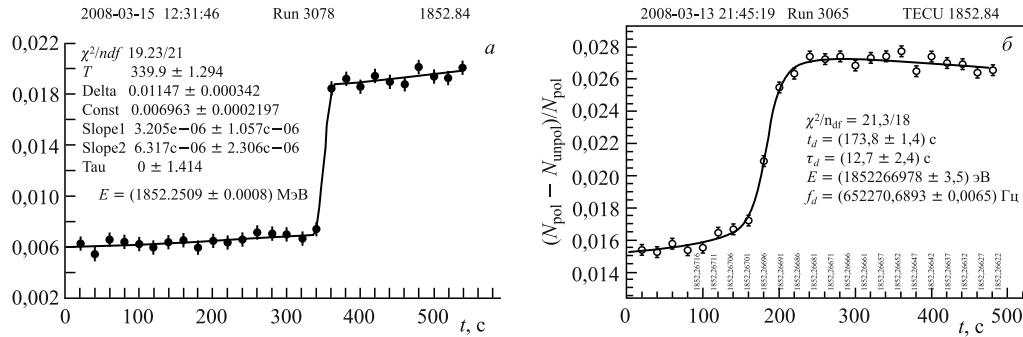


Рис. 2. а) Отношение скоростей счета электронов, рассеянных из поляризованного и неполяризованного сгустков при выполнении процедуры абсолютной калибровки энергии методом РД при скорости сканирования частоты деполаризатора (в единицах энергии пучка) около 300 эВ/с. б) Процесс деполаризации при тонком сканировании со скоростью 2,5 эВ/с и разрешением по частоте деполаризации $2 \cdot 10^{-9}$ (деполаризационный скачок затянут вследствие чувствительности тонкого сканирования к разбросу спиновых частот в пучке)

Еще одно применение метода РД, развиваемое на комплексе, — эксперимент по проверке СРТ-инвариантности путем сравнения частот спиновой прецессии электрона и позитрона в накопителе [13, 14]. В измерениях с двумя электронными сгустками достигнута рекордная статистическая точность 10^{-9} сравнения спиновых частот (рис. 2, б). Это дает надежду на сравнение спиновых частот электрона и позитрона, каждая из которых определяется комбинацией фундаментальных параметров частицы/античастицы, с точностью не хуже 10^{-8} .

3. КОМПТОНОВСКИЙ МОНИТОР ЭНЕРГИИ

Методом РД определяется мгновенное значение энергии пучка. Но как показали наши исследования этим методом, энергия ВЭПП-4М может меняться в течение суток на несколько десятков кэВ, т. е. больше, чем на 10^{-5} . Это связано и с магнитными циклами, и с температурной нестабильностью кольца (суточной и сезонной). Для мониторинга энергии пучка в эксперименте с набором статистики в КЕДРе на ВЭПП-4М, а также в

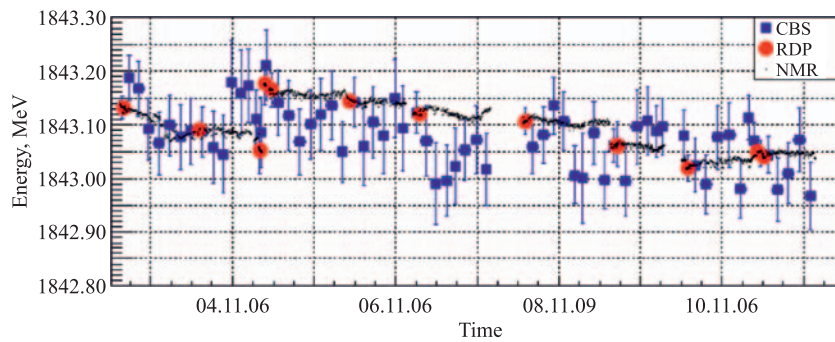


Рис. 3. Заход по изучению стабильности энергии пучка, определяемой по методам РД (RD), ОКР (CBS) и по данным ЯМР в калибровочном магните (NMR). Точки с данными РД для наглядности значительно увеличены в размерах

некоторых экспериментах на установке «Дейтрон» (ВЭПП-3) применяется метод обратного комптоновского рассеяния (ОКР), в котором энергия релятивистских электронов находится по краю спектра обратно рассеянных лазерных фотонов (10 мкм) с точностью $5 \cdot 10^{-5}$ за 10 мин наблюдения, а энергетический разброс по ширине этого края с точностью около 5% [12]. ОКР-фотоны регистрируются германиевым детектором повышенной чистоты. Для внутренней калибровки шкалы со спектром применяются различные изотопы. Систематическая ошибка контролируется путем сравнения с РД. Первые опыты по определению энергии релятивистского пучка с помощью ОКР сделаны в [15]. На ВЭПП-4 ОКР впервые применялось в регулярных физических экспериментах. На рис. 3 показаны совместные измерения энергии методами РД и ОКР.

4. ПОПЕРЕЧНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ (ОС)

Одной из проблем кольца ВЭПП-4М как установки, выполненной по устаревшим подходам и технологиям, является большой импеданс вакуумной камеры. Так как требования к качеству экспериментов на ВЭПП-4М постоянно растут, нашими специалистами были разработаны на основе цифровых технологий и введены в строй системы поперечной ОС для подавления ТМС (fast head tail) неустойчивости [16] с целью повышения порогового тока, а также продольной ОС для подавления возбуждения фазовых колебаний, особенно в режиме 2×2 встречных сгустков [1, 17, 18]. Предельный ток на 1,8 ГэВ около 7 мА ограничен неустойчивостью вертикальных колебаний, обусловленной связью поперечных мод. Разработанная система обратной связи для управления движением каждого из четырех сгустков имеет регулируемую фазу, что позволяет реализовать как реактивную, так и резистивную схемы (рис. 4). Экспериментально было обнаружено, что резистивная обратная связь является эффективной. Исследовалось влияние ОС на эффективность инжекции пучка при небольшом положительном хроматизме ($C_x = 2$, $C_y = 4$). Оптимальная фаза обратной связи оказалась ближе к нулю (резистивная обратная связь), чем к 90° (реактивная обратная связь). При этом был достигнут ток в сгустке,

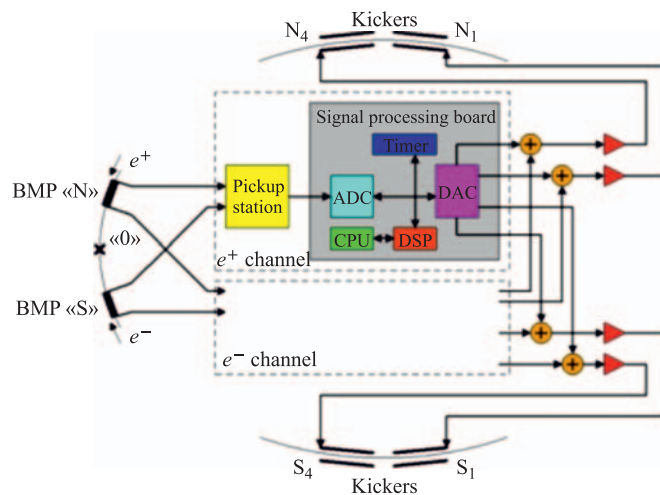


Рис. 4. Блок-схема поперечной обратной связи на ВЭПП-4М

в 3,5 раза превышающий порог ТМС-неустойчивости. Были проведены также эксперименты с большим положительным хроматизмом ($C_y = 7$) при выключенной ОС. В этом случае поперечная неустойчивость подавляется за счет быстрого раскогеренирования колебаний. Получен ток 25 мА в сгустке. Порог 6,5 мА превышен в 3–3,5 раза. Но время жизни пучка хуже, чем в случае применения ОС.

5. ПРОДОЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Основной режим работы ВЭПП-4М в экспериментах по ФВЭ — с двумя электронными и двумя позитронными сгустками. Побочным эффектом увеличения количества сгустков является возникновение неустойчивости продольного движения пучков, приводящей к фазовым колебаниям с большой амплитудой. Фазовые колебания приводят к резкому снижению светимости и времени жизни пучка. Высыпание частиц пучка на дрейфовую камеру детектора КЕДР может спровоцировать пробой высокого напряжения и повредить дрейфовую камеру. Причиной неустойчивости является резонансное возбуждение пучком высших мод колебаний ускоряющих резонаторов. Для подавления высших мод в каждом из пяти резонаторов ВЭПП-4М предусмотрено по три управляемых механизма подавления высших мод. Однако при изменении температуры резонаторов происходит изменение его геометрических размеров, выводящее резонатор из области устойчивого движения пучка. Для надежного подавления неустойчивости разработана и введена в эксплуатацию система продольной обратной связи. Поскольку в накопителе циркулируют две пары сгустков (e^+ и e^-), система ОС должна подавлять четыре связанные моды колебаний — две для электронов и две для позитронов. Сигналы, пропорциональные продольной фазе каждого сгустка, получаются на каждом обороте пучка с помощью быстрого фазового детектора, подключенного к датчику пучка. Суммарный сигнал каждой пары соответствует синфазной моде колебаний, разностный сигнал — противофазной. Эти сигналы используются для модуляции ВЧ-напряжения, подаваемого на кикер. Два высокочастотных кикера (рис. 5) 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. Резонаторы соединены так, что для частиц определенной полярности (e^+ и e^-), движущихся в своем направлении, фаза ВЧ-напряжения во втором резона-

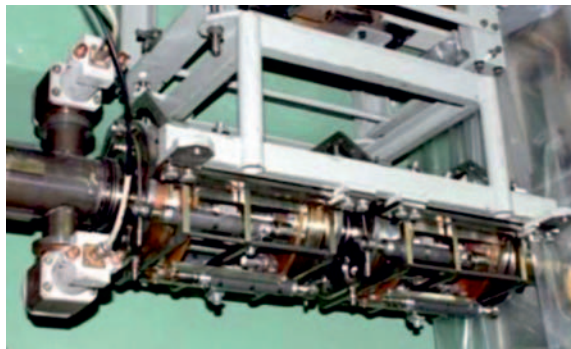


Рис. 5. ВЧ-кикер в кольце ВЭПП-4М

торе сдвинута на $\pi/2$ относительно фазы в первом резонаторе. Таким образом, частицы данной полярности получают двойной толчок, в то время как на частицы, движущиеся в противоположном направлении, кикер практически не оказывает воздействия. Система ОС способна подавлять колебания с амплитудой начиная с уровня, который на порядок меньше предельно допустимого для безопасной работы детектора КЕДР [19].

6. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

На накопителе ВЭПП-3 проводятся эксперименты по ядерной физике на внутренней газовой мишени, которая представляет собой рекордную по интенсивности струю газа (дейтерия или водорода), вводимую непосредственно в вакуумную камеру накопителя. При этом струя при необходимости может быть поляризована (с толщиной до $6 \cdot 10^{13}$ атомов/см²) [20]. Недавно на установке «Дейтрон» получены новые данные по двухфотонному вкладу в упругом электрон-протонном рассеянии [21]. С этой целью измерено отношение сечений рассеяния электронов и позитронов (рис. 6). Такие измерения необходимы для объяснения противоречий, имеющихся в настоящее время в мировых экспериментальных данных по изучению формфактора протона.

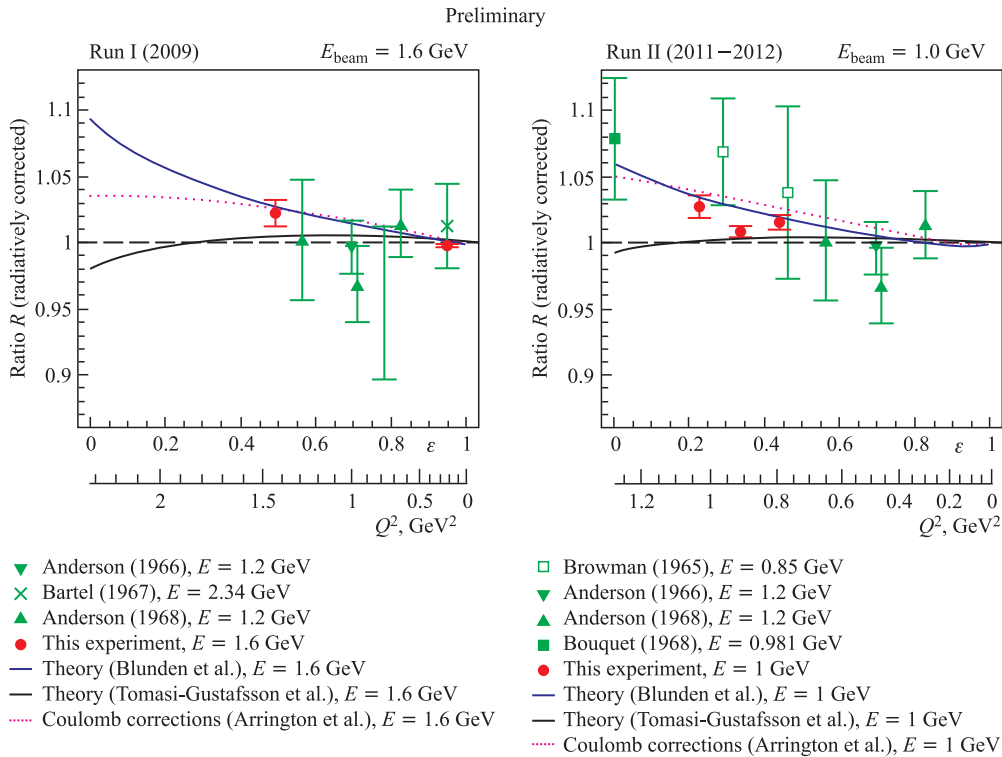


Рис. 6. Отношение сечений упругого рассеяния электрона и позитрона на протоне в теоретических моделях и найденное экспериментально при двух значениях энергии циркулирующего пучка (1,6 и 1,0 ГэВ). Данные с наименьшей погрешностью получены на установке «Дейтрон»

7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЫВЕДЕННОМ ПУЧКЕ

Электроны, циркулирующие в кольце ВЭПП-4М, дают тормозные гамма-кванты на остаточном газе или на конвертере, вводимом в вакуумную камеру (рис. 7) [22]. Гамма-кванты могут быть использованы непосредственно или рождают пару e^+e^- в конвертере для калибровки компонент детекторов. Недавно на ВЭПП-4М проведен цикл экспериментов по изучению новой технологии FARICH, в которой электрон из рождающейся пары, проходя слойку аэрогеля с градиентом плотности, дает сфокусированный черенковский свет. Это позволяет уменьшить ошибку в определении угла раствора конуса излучения. В данном эксперименте применялась светоприемная матрица фирмы «Phillips», а аэрогелиевый радиатор был относительно тонкий, что дополнительно повышает точность черенковского детектора.

8. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПУЧКАХ СИ

На ускорителях комплекса ВЭПП-3 и ВЭПП-4М проводятся регулярные исследования с использованием выведенных пучков СИ в таких областях, как материаловедение, изучение взрывных процессов, археология, биология и медицина, нанотехнологии и т. д. На ВЭПП-3, на котором программа экспериментов с СИ действует уже более 30 лет, для этих целей оборудованы 12 пользовательских станций. Они обеспечивают исследования по рентгеновской литографии, дифрактометрии при высоких давлениях и с временным разрешением, EXAFS, рентгенофлуоресцентному анализу, рентгеновской микроскопии,

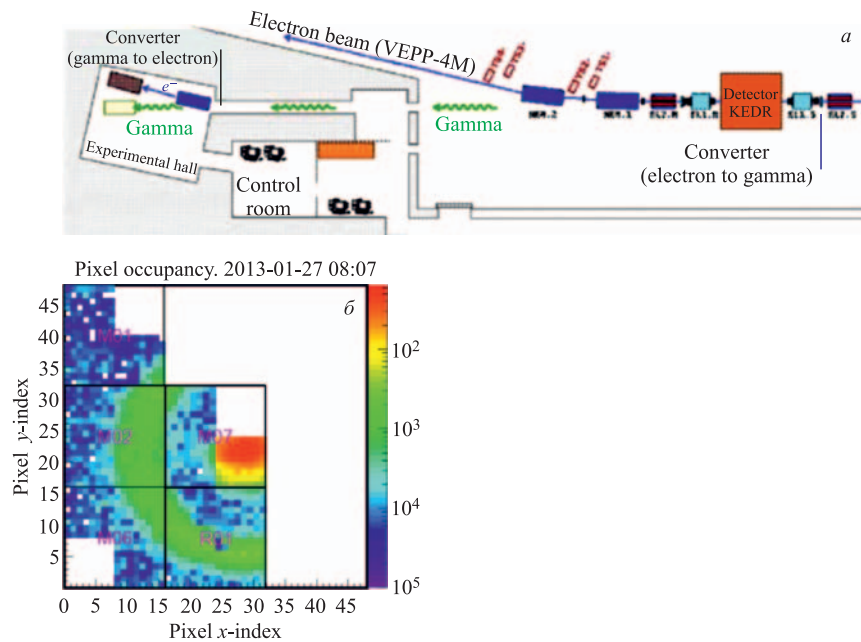


Рис. 7. *a*) Установка для экспериментов на выведенном пучке на ВЭПП-4М; *б*) один из недавних результатов — зарегистрированная картина распределения интенсивности черенковского излучения из слойки аэрогеля



Рис. 8. Установка для изучения быстропротекающих процессов в зале для экспериментов с СИ на ВЭПП-4М

малоугловому рассеянию и др. Несколько лет назад стартовала программа по СИ в новом экспериментальном зале на кольце ВЭПП-4М. В 2011 г. установлен семиполюсный вигглер-магнит, интенсивность СИ из которого на порядок выше, чем из поворотных магнитов ВЭПП-4М. Подготовлена камера высокого давления (ИГ СО РАН) для изучения быстропротекающих процессов (рис. 8).

9. НАБЛЮДЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕСЕЧЕНИЯ РЕЗОНАНСА

Мы экспериментально изучили [23] процесс пересечения бетатронного резонанса $\nu_y = k/3 + \delta$ ($k = 23$, $\delta \ll 1$) в вертикальном движении, вызванного секступольными полями. Это частный случай движения вблизи одномерного нелинейного резонанса вида $m\nu_\beta = n$, описываемый гамильтонианом в переменных действие I – фаза φ [24]

$$H = \delta(\theta)I + \alpha_0 I^2 + A_n I^{m/2} \cos m\varphi.$$

Здесь нелинейная зависимость частоты от амплитуды определяется коэффициентом α_0 , A_n — сила резонансного возмущения, расстройка δ зависит от «времени» — азимута θ . В последние годы снова вырос интерес к вопросам пересечения резонансов (ранее относящимся, в основном, к методу резонансной эжекции). Это связано с интенсивным развитием синхротронов FFAG (fixed field alternating gradient) [25] и затухательных колец (damping ring) для линейных коллайдеров, в которых затухание колебаний частиц сопровождается большим сдвигом бетатронной частоты ν_β (до 0,1–0,2) с пересечением множества резонансов из-за пространственного заряда и сильной нелинейности [26]. В эксперименте на ВЭПП-4М мы управляли скоростью пересечения и нелинейным сдвигом частоты (коэффициент α_0). Как было установлено, действительная мощность исследуемого резонанса определялась поворотом нормальных бетатронных мод в штатных секступольных магнитах при коэффициенте связи — отношении эмиттансов — 2–4%. Электростатические датчики пооборотного положения пучка с пространственным разрешением 50 мкм были использованы для записи возбуждаемых ударом когерентных бетатронных колебаний с целью восстановления фазовых траекторий [27]. Мощность

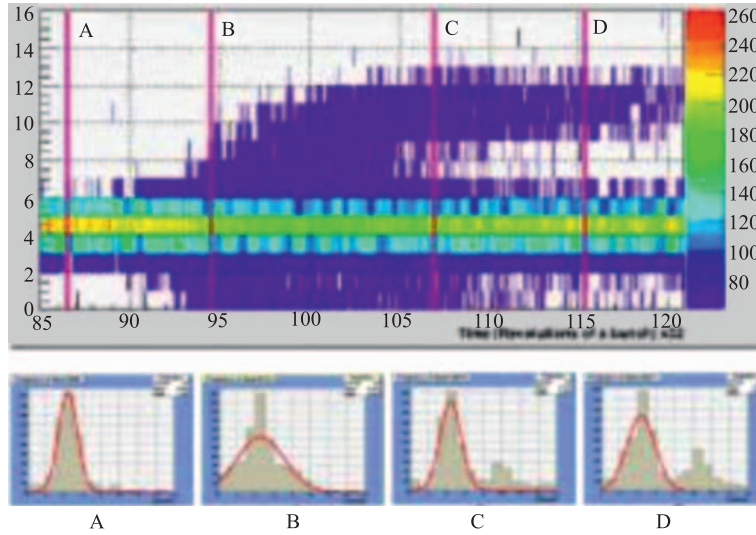


Рис. 9. Вверху — наблюдаемая эволюция вертикального профиля пучка с разрешением 0,2 мм. Ясно различим момент захвата частиц в «островок» устойчивости. Внизу — поперечное распределение плотности частиц на разных стадиях пересечения резонанса

резонанса оценивалась по величине их амплитудных биений. Наблюдение за вертикальным профилем пучка велось на каждом обороте с помощью «Hamamatsu R5900U-00-L16 Multi-Anode Photomultiplier Tube». Потери частиц измерялись сцинтилляционными счетчиками, вертикально двигаемыми в вакуумную камеру, и по изменению интенсивности СИ. В зависимости от значения параметра α_0 можно различать два случая. При $\alpha_0 \neq 0$ на фазовой плоскости появляются три дополнительные области устойчивости вокруг центральной. Когда резонанс пересекается достаточно медленно (адиабатически), частицы захватываются в эти резонансные «островки» (рис. 9). В качественно иной ситуации ($\alpha_0 = 0$) нет дополнительных областей устойчивости, и движение частиц в точном резонансе нестабильно. Потери частиц могут происходить в этом случае и в адиабатическом режиме, зависящем от скорости и направления изменения резонансной отстройки (рис. 10). Данные на последнем рисунке нормированы на результирующие потери частиц из пучка, которые не являются полными, как предполагается в теории. Факт неполных потерь объясняется, по-видимому, влиянием радиационного затухания, не учитываемого в теории, а также неконтролируемым нелинейным сдвигом частоты при больших амплитудах. Измеренный временной график нормированных потерь при адиабатически медленном пересечении резонанса хорошо соотносится с кривыми, рассчитанными из уравнения для тока покидающих пучок частиц, которое в случае малого хроматизма (как в эксперименте) имеет вид [28]

$$J(t) = \frac{eN}{T} \frac{9\pi\delta_0^2}{|P|^2 \Sigma_y} \left| 1 - \frac{2t}{T} \right| \exp \left\{ -\frac{9\pi\delta_0^2 (1 - 2t/T)^2}{4|P|^2 \Sigma_y} \right\},$$

$$P = \left\langle \frac{i\hbar}{4} \tilde{f}_y^3 e^{-in\theta} \right\rangle, \quad h = \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2};$$

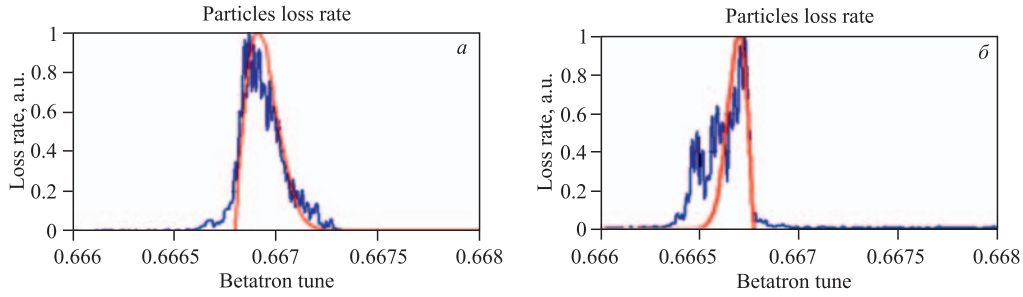


Рис. 10 (цветной в электронной версии). Распределение потерь частиц во времени, измеренное сцинтилляционными счетчиками (синяя линия) и рассчитанное (красная линия) по адиабатической теории [28] при перестройке частоты сверху вниз (а) и снизу вверх (б)

T — время линейной перестройки частоты в интервале $-\delta_0 \leq \delta \leq \delta_0$; \tilde{f}_y — комплексное сопряжение функции Флоке; Σ_y — площадь на фазовой плоскости (которая равна $2\pi\epsilon_y$, ϵ_y — вертикальный эмиттанс пучка); N — полное число частиц.

10. ВЧ-РАЗВЕДЕНИЕ ОРБИТ

В начале 2013 г. мы испытали недавно предложенную и разработанную в ИЯФ систему ВЧ-разведения орбит электронов и позитронов в паразитном месте встречи (центр технического промежутка ВЭПП-4М) [29]. Она предназначена для использования вместо традиционного электростатического разведения орбит в прецизионном эксперименте

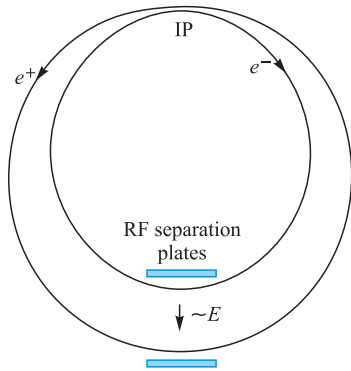


Рис. 11. Схематическая двухоборотная орбита в виде плоской кривой «Улитка Паскаля»

по проверке СРТ-инвариантности путем сравнения спиновых частот электрона и позитрона методом РД [13–14]. В этом эксперименте электростатический метод может давать систематическую погрешность порядка 10^{-6} при требуемой 10^{-9} . Альтернативный способ основан на применении ВЧ радиального электрического поля с частотой, строго равной половине частоты обращения частицы в коллайдере ($f_0 = 819$ кГц). Пластины, на которых создается это поле, находятся на азимуте с паразитным местом встречи. В этом случае электронный и позитронный сгустки движутся по общей орбите, замыкающейся через два оборота (рис. 11). Систематическая погрешность СРТ-эксперимента, связанная с разницей интегралов магнитного поля вдоль орбит электронов и позитронов, таким образом минимизируется. Радиальное смещение орбиты на азимуте ВЧ-разведения равно

$$X = \frac{\chi\beta}{2 \sin 2\pi\nu_x} (\cos 2\pi\nu_x - 1),$$
 χ — угол дефлексии в поле пластин, β — локальное значение горизонтальной бета-функции. Вблизи целых значений частоты радиальных бетатронных колебаний $\nu_x \rightarrow n$ имеем $X \rightarrow 0$. Около полуцелых значений $\nu_x = (2n+1)/2 + \epsilon$ смещение X становится значительным ($\epsilon \ll 1$): $X \approx \chi\beta/(2\pi\epsilon)$. Согласно проведенному численному моделированию эффектов встречи [30] необходимо обеспечить разведение орбит $2X \geq 7\sigma_x$, σ_x — радиальный размер пучка.



Рис. 12. Изображение встречных пучков на экранах СИ-мониторов: 1,1 мА электронного (слева) и 0,3 мА позитронного (справа). Амплитуда напряжения на пластинах ВЧ-разведения 6,5 кВ ($E = 1,85$ ГэВ). Видны два положения двухоборотной орбиты

Система ВЧ-разведения включает управляемый амплитудно-фазовый модулятор для генерации синусоидального сигнала 409 кГц с автоматической подстройкой, 200-Вт усилитель мощности и резонансный контур, подключенный к двум отклоняющим пластинам, длиной 130 см. Проведено несколько экспериментов в режиме встречи 1×1 с использованием данной системы. В отсутствие какого-либо разведения орбит в паразитном месте встречи критический ток пучков неприемлемо падает (на 1,85 ГэВ — с 3 до 0,3 мА). Рис. 12 иллюстрирует эксперимент, в котором полностью выключена система электростатического разведения, но включено ВЧ-разведение в паразитном месте встречи. Значение тока в электронном сгустке при этом попадает в диапазон рабочих значений, а эффекты встречи подавлены. В дальнейшем мы планируем оптимизировать режим встречных пучков с ВЧ-разведением и приступить к сравнению спиновых частот электронов и позитронов в созданных новых условиях.

11. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫСИТЬ СВЕТИМОСТЬ

В ближайшее время мы намерены поставить ускорительный эксперимент, направленный на увеличение светимости коллайдера ВЭПП-4М на низкой энергии (< 2 ГэВ). С этой целью будет уменьшена радиальная бета-функция β_x^* в месте встречи в 2–3 раза, что соответственно увеличит значение параметра монохроматизации $\lambda_m = \frac{\sigma_{xs}}{\sigma_{x\beta}} = \frac{\eta_x^* \sigma_E}{\sqrt{\epsilon_x \beta_x^*}}$, отношения синхротронного и бетатронного вкладов в радиальный размер пучка: η_x^* — радиальная дисперсия; σ_e — относительный разброс энергии; ϵ_x — радиальный эмиттанс пучка. Исходная величина этого параметра на ВЭПП-4М — около 2. Смысл, заключенный в параметре λ_m , наиболее понятен в пределе $\lambda_m \rightarrow \infty$, когда бетатронный вклад в размер пренебрежимо мал. При этом зависимость вертикального воздействия на частицу со стороны встречного сгустка от горизонтальных бетатронных колебаний самой частицы (x) устраняется. Таким образом подавляется эффект резонансов связи. Если рост λ_m составит конечную величину, то: вырастет критический ток из-за уменьшения линейного радиального сдвига частоты по эффектам встречи $\xi_x = \frac{Nr_e}{2\pi\gamma} \frac{\beta_x^*}{\sigma_x^2}$; критический сдвиг частоты по вертикали $\xi_y = \frac{Nr_e}{2\pi\gamma} \frac{\beta_y^*}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$ увеличится из-за подавления резонансов связи.

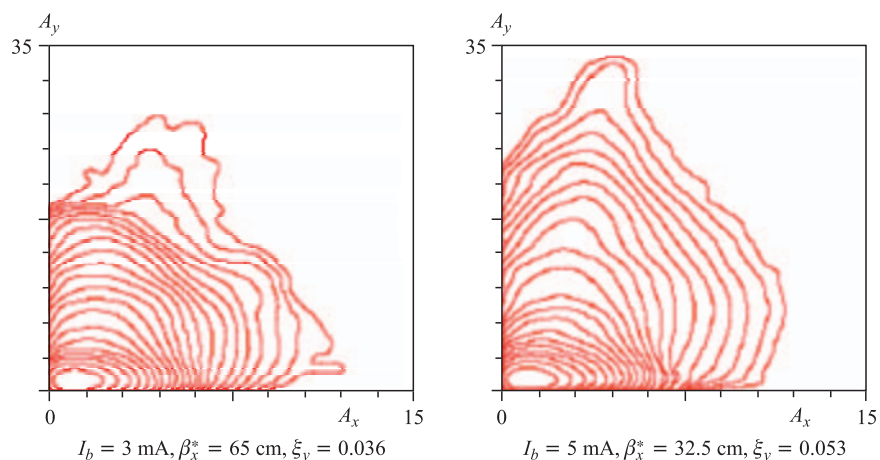


Рис. 13. Равновесное распределение на плоскости нормализованных бетатронных амплитуд в двух случаях, различающихся в значениях тока пучка, функций β_x^* и результирующего параметра ξ_y ($E = 1,85$ ГэВ). Плотность между соседними контурными линиями меняется в e раз. Центральные области распределений имеют примерно одинаковые размеры, несмотря на то, что ток 3 мА при $\beta_x^* = 65$ см является критическим

Численное моделирование эффектов встречи [30] демонстрирует увеличение критического тока с 3 до 5 мА в случае уменьшения β_x^* в два раза (рис. 13). Ожидается заметное увеличение светимости, которая пропорциональна произведению тока пучка на критический сдвиг частоты по вертикали.

12. ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

В настоящее время нами интенсивно рассматриваются различные идейные сценарии и технические планы соответствующих преобразований комплекса в рамках существующей инфраструктуры. В частности, недавно были подготовлены проекты источника СИ с эмиттансом электронного пучка 1 нм и супер- ϕ - ψ -фабрики. Оба проекта предполагают использование туннеля ВЭПП-4М. Энергия пучка в проекте источника СИ 3 ГэВ, ток 500 мА. В длинном (70 м) прямолинейном промежутке расположена система излучателей ID (Insertion Device) для генерации СИ с параметрами, подходящими для той или иной научной задачи. Супер- ϕ - ψ -фабрика, основанная на схеме Crab-Waist [31], должна обеспечивать в диапазоне энергий 0,5–1,55 ГэВ пиковую светимость от 10^{34} до $5 \cdot 10^{34}$ см⁻² · с⁻¹. Данный проект в 10 раз дешевле проекта супер- CC_{τ} -фабрики, развитого при ведущем участии команды ВЭПП-4 и включенного в список мега-сайенс-проектов РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 2002 г. ускорительный комплекс ВЭПП-4 с детектором КЕДР обеспечивает получение результатов мирового уровня по ФВЭ. На нем успешно выполняется много других научных программ (ядерная физика, СИ, ускорительная физика и др.). Разработка перспективных планов развития и преобразования комплекса в качественно новую установку становится одной из приоритетных задач.

Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации, РФФИ (гранты 10-02-00645, 11-02-01064, 11-02-01422, 10-02-00904), СО РАН (Интеграционный грант 103). Проект супер- ϕ - ψ -фабрики поддержан Минобрнауки РФ через Новосибирский государственный технический университет (грант 2012-1.1-12-000-1011-1812).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anashin V. et al. VEPP-4M Collider: Status and Plans // Proc. of EPAC. 1998. V. L. P. 400;
Алешаев А. Н. и др. Ускорительный комплекс ВЭПП-4. Препринт ИЯФ 2011-20. Новосибирск, 2011. 136 с.
2. Anashin V. V. et al. The KEDR Detector // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44, iss. 4.
3. Anchugov O. V. et al. Use of the Methods of Accelerator Physics in Precision Measurements of Particle Masses at the VEPP-4 Complex with the KEDR Detector // Instr. Exp. Tech. 2010. V. 53, No. 1. P. 15–28.
4. Aulchenko V. M. et al. New Precision Measurement of the J/ψ and ψ' meson Masses // Phys. Lett. B. 2003. V. 573. P. 63–79.
5. Anashin V. V. et al. Measurement of D^0 and D^+ Meson Masses with the KEDR Detector // Phys. Lett. B. 2010. V. 686. P. 84–90.
6. Anashin V. V. et al. Tau Mass Measurement at KEDR // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 189. P. 21–23.
7. Anashin V. V. et al. Measurement of $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$ and $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$ // Phys. Lett. B. 2010. V. 685. P. 134–140.
8. Anashin V. V. et al. Measurement of $J/\psi \rightarrow \eta_c\gamma$ at KEDR // Chin. Phys. C. 2010. V. 34, No. 6. P. 831–835.
9. Shamov A. (KEDR Collab.). Measurement of J/ψ Leptonic Width with the KEDR Detector // Ibid. P. 836–841.
10. Anashin V. V. et al. Measurement of Main Parameters of the $\psi(2S)$ Resonance // Phys. Lett. B. 2012. V. 711, No. 3-4. P. 280–291.
11. Anashin V. V. et al. Measurement of $\psi(3770)$ Parameters // Ibid. P. 292–300.
12. Blinov V. E. et al. Review of Beam Energy Measurements at VEPP-4M Collider: KEDR/VEPP-4M // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 23.
13. Anchugov O. et al. Record-High Resolution Experiments on Comparison of Spin Frequencies of Electron Bunches Using the Resonant Depolarization Technique in the Storage Ring // Proc. of EPAC-2006. TH0BF103. P. 2787–2789.
14. Blinov V. et al. Study of the Possibility of Increasing the Accuracy of CPT Invariance Test at Electron–Positron Storage Rings // ICFA Beam Dyn. Newslett. 2009. V. 48. P. 207–217.
15. Klein R. et al. Beam Diagnostics at the BESSY I Electron Storage Ring with Compton Backscattered Laser Photons: Measurement of the Electron Energy and Related Quantities // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 384. P. 293–298.
16. Chao A. Physics of Collective Beam Instabilities. N. Y.: Wiley, 1993.
17. Cherepanov V. P. et al. The VEPP-4M Transverse Bunch-by-Bunch Feedback System // Proc. of RUPAC-2006, Novosibirsk, 2006. P. 238–240.
18. Arbuзов V. S. et al. Feedback System for Damping of Longitudinal Bunch Oscillations in VEPP-4 Collider // Ibid.

19. *Dement'ev E. N. et al.* Commissioning Feedback Systems at VEPP-4M Electron–Positron Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 7. P. 466–472.
20. *Dyug M. V. et al.* Internal Polarized Deuterium Target with Cryogenic Atomic Beam Source // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 495. P. 8–19.
21. *Gramolin A. V. et al.* Measurement of the Two-Photon Exchange Contribution in Elastic ep Scattering at VEPP-3 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2012. V. 225–227. P. 216–220.
22. *Barnyakov A. Yu. et al.* Focusing Aerogel RICH for Particle Identification and Momentum Measurement // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 639. P. 290–293.
23. *Anchugov O. V. et al.* Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron–Positron Collider // JETP. 2009. V. 109, No. 4. P. 590–601.
24. *Kolomensky A. A., Lebedev A. N.* Theory of Cyclic Accelerators. Amsterdam: North Holland Publ. Co., 1966.
25. *Lee S. Y.* Emittance Dilution in Resonance Crossing of FFAG Accelerators // ICFA Beam Dyn. Newslett. 2007. V. 43. P. 51.
26. *Levichev E., Piminov P., Shatilov D.* Nonlinear Beam Dynamics with Strong Damping and 6 Space Charge in the CLIC Damping Ring // Proc. of PAC-2009. TH6PFP093.
27. *Kalinin A., Smaluk V.* Turn-by-Turn Phase Diagram Construction for Non-linear Betatron Oscillations // Proc. of the Eur. Workshop on Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC-1999). P. 112–114.
28. *Nikitin S. A.* Adiabatic Theory of Slow Extraction of Particles from a Synchrotron // Proc. of EPAC-2006. P. 2119–2121.
29. *Blinov V. E. et al.* RF System for Electron and Positron Beams Orbit Separation at VEPP-4M. Preprint BINP 2013-12. 18 p. (in Russian).
30. *Shatilov D.* Beam–Beam Simulations at Large Amplitudes and Life Time Determination // Part. Accel. 1996. V. 52. P. 65–93.
31. *Raimondi P.* Status of the SuperB Effort. Presentation at the 2nd Workshop on SuperB Factory. LNF-INFN. Frascati, 2006; <http://www.lnf.infn.it/conference/superb06/talks/raimondi1.ppt>.