

*На правах рукописи*

**НИКОЛАЕВ Иван Борисович**

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ  
ВЭПП-4М МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОЙ  
ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ**

**01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2012**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БЛИНОВ – кандидат физико-математических наук,  
Владимир Евгеньевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОЖЕВНИКОВ – доктор физико-математических наук,  
Аркадий Алексеевич доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

КООП – доктор физико-математических наук,  
Иван Александрович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, главный научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ – Физико-технический институт Томского  
ОРГАНИЗАЦИЯ: политехнического университета, г. Томск.

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 г.  
в “\_\_\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.С. Фадин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера (ИЯФ СО РАН) ведутся эксперименты с универсальным магнитным детектором КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. Физическая программа детектора нацелена на изучение  $\Psi$ - и  $\Upsilon$ -мезонов и двухфотонной физики, а также на измерение массы  $\tau$ -лептона.

Прецизионное измерение масс узких резонансов  $\Psi$  и  $\Upsilon$  семейства создает прецизионные реперы в энергетической шкале ускорителей, работающих в области энергии от 1-го до 5.5 ГэВ, а также дает возможность проверить ряд теоретических моделей квантовой хромодинамики, предсказывающих значения масс этих частиц. Ошибка измерения масс ограничена точностью определения энергии пучков и составляла в предыдущих экспериментах  $(1 \div 5) \times 10^{-5}$ . Для повышения точности в несколько раз, необходима калибровка энергии пучков с точностью  $10^{-6}$ .

Значение массы  $\tau$ -лептона вместе с его временем жизни и вероятностью распада в  $e\nu\nu$  может быть использовано для проверки гипотезы лептонной универсальности — одного из постулатов Стандартной модели элементарных частиц. Табличное значение массы  $m_\tau = 1777.99^{+0.29}_{-0.26}$  МэВ до недавнего времени определялось лишь одним экспериментом коллаборации BES. Поэтому требовалось новое независимое измерение массы  $\tau$ -лептона.

Всё вышеперечисленное указывает на актуальность прецизионного измерения энергии сталкивающихся пучков с точностью  $10^{-6}$  (1 кэВ) на ускорителе ВЭПП-4М. Для решения этой задачи в данной работе применён метод резонансной деполяризации, который позволяет измерять энергию релятивистских пучков с рекордной точностью.

### Цель диссертационной работы

Создание системы прецизионного измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации для проведения экспериментов с детектором КЕДР на ускорителе ВЭПП-4М.

## **Личный вклад автора**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

## **Научная новизна**

Впервые в мире создана распределённая система регистрации частиц внутрисгусткового рассеяния с рекордной эффективностью регистрации.

С использованием созданной системы получена точность однократной калибровки энергии  $0.9 \times 10^{-6}$  (2 кэВ), что в несколько раз превышает точность достигнутую ранее методом резонансной деполяризации.

Впервые в мире реализован режим двукратных калибровок энергии на одном пучке со сканированием в разных направлениях по частоте, позволяющий исключить потенциально опасные источники систематических ошибок метода резонансной деполяризации.

Впервые измерена зависимость интенсивности внутрисгусткового рассеяния в большом диапазоне энергий от 1.85 до 4 ГэВ.

## **Научная и практическая ценность**

Рекордные по точности калибровки энергии пучка ускорителя ВЭПП-4М позволили измерить массы  $J/\psi$ -,  $\psi(2S)$ -,  $\psi(3770)$ -,  $D^+$ -мезонов и  $\tau$ -лептона с лучшей в мире точностью.

Значения масс  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов могут быть использованы как реперы для калибровки энергетической шкалы ускорителей, работающих в области энергии  $1 \div 2$  ГэВ, таких как BEPC-II (Китай), CESR-C (США) и будущих Super- $c$ - $\tau$ -фабрик, а также будут востребованы для проверки решеточных и потенциальных моделей квантовой хромодинамики.

Значение массы  $\tau$ -лептона вместе с его временем жизни и вероятностью распада в  $e\nu\nu$  может быть использовано для проверки гипотезы лептонной универсальности.

Созданная система прецизионного измерения энергии может быть использована на ВЭПП-4М для проверки СРТ-теоремы путём сравнения частот прецессии спина электронов и позитронов.

Методические наработки и технологии, освоенные при создании системы прецизионного измерения энергии ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации, могут быть использованы в системах измерения энергии пучка будущих ускорителей частиц в России и за рубежом.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Создана система регистрации тушековских электронов поляриметра ВЭПП-4М, предназначенная для прецизионного измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации со скоростью счёта около 1 МГц. Деполяризационный эффект определяется с достоверностью до 70 стандартных отклонений. Система позволяет проводить многократные калибровки энергии на одном пучке и исключить потенциально опасные источники систематических ошибок в измерении энергии.
2. Создана система сбора данных и программное обеспечение для автоматизации процесса калибровки энергии методом резонансной деполяризации. Впервые в мире процесс калибровки энергии был полностью автоматизирован. За время экспериментов с детектором КЕДР на ускорителе ВЭПП-4М проведено более 3500 калибровок энергии, что превышает суммарное число измерений энергии, проведенных в мире, с использованием этого метода.
3. Проведён анализ систематической ошибки в измерении частоты прецессии спина. Относительная ошибка измерения энергии для однократной калибровки энергии составляет  $0.9 \times 10^{-6}$  (2 кэВ), что в несколько раз лучше точности, достигнутой ранее методом резонансной деполяризации.
4. Выполнен численный расчёт скорости счета частиц внутрисгусткового рассеяния и величины деполяризационного эффекта в двумерном релятивистском приближении по модели Байера-Каткова-Страховенко.
5. Измерена интенсивность внутрисгусткового рассеяния в диапазоне энергий от 1.85 до 4 ГэВ.
6. Развита методика интерполяции энергии пучка ВЭПП-4М между калибровками энергии методом резонансной деполяризации с использованием измеряемых параметров ускорителя. Достигнута точность  $(8 \div 15) \cdot 10^{-6}$  (15 ÷ 30 кэВ) в зависимости от режима работы ускорителя.
7. Проведён цикл прецизионных экспериментов с детектором КЕДР на ускорителе ВЭПП-4М, в которых для измерения энергии пучка использовался тушековский поляриметр. С лучшей в мире точностью в них измерены массы  $J/\psi^-$ ,  $\psi(2S)^-$ ,  $\psi(3770)^-$ ,  $D^+$ -мезонов и  $\tau$ -лептона.

## Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), а также на следующих российских и международных конференциях: IEEE Particle Accelerator Conference (Чикаго, 2001), 8th European Particle Accelerator Conference (Париж, 2002), 9th European Particle Accelerator Conference (Lucerne, Switzerland, 2004) на Научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН Физика фундаментальных взаимодействий (г. Москва, 2005), 33 International Conference on High Energy Physics (Москва, 2006), IX International Workshop on Tau Lepton Physics (Пиза, 2006), Instrumentation For Colliding Beam Physics (Новосибирск, 2002, 2008), XI International Workshop on Tau Lepton Physics (Манчестер, 2010), 35th International Conference of High Energy Physics (Париж, 2010), Particle Accelerator Conference (Нью-Йорк, 2011).

## Публикации

По материалам диссертации опубликовано более 20 работ.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и библиографии. Общий объем диссертации 118 страниц машинописного текста, включая 37 рисунков, 3 таблицы и библиографию из 81 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** диссертации представлен обзор методов измерения энергии релятивистских пучков и методов измерения поляризации. Обоснован выбор метода резонансной деполяризации и внутрисгусткового рассеяния (эффекта Тушека) для калибровки энергии.

Метод резонансной деполяризации основан на зависимости частоты прецессии спина заряженной частицы ( $\Omega$ ) в магнитном поле ускорителя от энергии ( $E$ ) этой частицы.

$$\Omega = \omega_0 \left( 1 + \frac{\mu' E}{\mu_0 m} \right),$$

где  $\omega_0$  — частота обращения пучка в ускорителе,  $\mu'$ ,  $\mu_0$  — аномальная и нормальная части магнитного момента частицы,  $m$  — масса частицы. Частота прецессии спина определяется по резонансному разрушению поляризации пучка в поле электромагнитной ТЕМ-волны с частотой  $\omega_d$  при выполнении условия

$$\Omega \pm \omega_d = n\omega_0,$$

где  $n$  — целое число. Поляризация измеряется по интенсивности процесса внутрисгусткового рассеяния.

**Вторая глава** посвящена подробному изложению идеи метода резонансной деполяризации. Обсуждается ширина спиновой линии, ограничивающая абсолютную точность метода, которая для ВЭПП-4М составляет  $5 \times 10^{-7}$  (1 кэВ). Рассмотрена феноменологическая модель вынужденной деполяризации и выведена формула, описывающая процесс деполяризации, которая необходима для оценки систематической погрешности определения частоты спиновой прецессии. Найдены режимы работы деполяризатора, позволяющие с заданной шириной спиновой линии проводить непрерывное сканирование по частоте.

**Третья глава** посвящена внутрисгустковому рассеянию (эффекту Тушека). Для оценки эффективности системы регистрации необходимо рассчитать вклад поляризации в интенсивность внутрисгусткового рассеяния. В связи с этим были проанализированы формулы релятивистской теории внутрисгусткового рассеяния с кулоновскими поправками В.М. Страховенко для двумерного распределения поперечных импульсов в пучке.

Для понимания характера зависимости интенсивности внутрисгусткового рассеяния и величины деполяризационного эффекта от энергии получены ультрарелятивистские формулы. Ультрарелятивистский случай соответствует большому по сравнению с массой электрона поперечным импульсам в пучке.

С учётом условий регистрации рассеянных внутри сгустка частиц конкретным счётчиком, находящимся в определённом месте ускорителя ВЭПП-4М, выполнен численный расчёт количества регистрируемых счётчиком тушековских электронов в единицу времени в зависимости от расстояния от счётчика до пучка. Расчётная загрузка счётчика составляет порядка 10 кГц, а величина деполяризационного эффекта - около 1%.

В разделе 3.4 получены формулы зависимости относительной разни-

цы скоростей счёта тушековских частиц от поляризованного и неполяризованного пучка от времени (деполяризационный эффект), которые необходимы для интерполяции экспериментальных данных и определения момента деполяризации.

В разделе 3.3 рассмотрены фоновые процессы, уменьшающие величину деполяризационный эффекта. Описана методика подавления фоновых событий, основанная на регистрации совпадений сигналов с двух счётчиков, находящихся внутри и снаружи орбиты пучка.

**В четвёртой главе** приведено описание экспериментальной установки: деполяризатора, системы регистрации тушековских электронов, системы сбора данных.

На ВЭПП-4М применён деполяризатор на ТЕМ-волне. Он состоит из пары размещённых внутри вакуумной камеры и разнесённых по вертикали проводящих пластин, согласованно подключённых к ВЧ генератору с перестраиваемой частотой. Стабилизация частоты ВЧ ВЭПП-4М, опорной частоты генератора и опорной частоты блока для измерения ведущего поля накопителя осуществляется от рубидиевого стандарта частоты с относительной точностью  $10^{-10}$ .

Система регистрации рассеянных внутри пучка электронов состоит из восьми подвижных сцинтилляционных счётчиков. Система сбора данных реализована на основе электроники, выполненной в стандарте КА-МАК. Она позволяет регистрировать события от четырёх одновременно циркулирующих в ускорителе сгустков. Программное обеспечение дает возможность рядовому оператору ВЭПП-4М осуществлять калибровку энергии автоматизируя рутинные операции: управление деполяризатором, выбор диапазона сканирования, подгонку результатов калибровки, сохранение и распечатку результатов. За время работы системы было проведено более трех тысяч калибровок энергии.

При характерном токе пучка в ВЭПП-4М равном 2 мА скорость счёта тушековских частиц составляет около 1 МГц, эффективность регистрации тушековских частиц — 75%, величина деполяризационного эффекта —  $1.5 \div 2.5\%$  в зависимости от энергии. Высокая эффективность регистрации позволяет проводить два измерения энергии на одном поляризованном пучке.

С целью изучения возможности использования тушековского поляриметра для калибровки энергии методом резонансной деполяризации в области энергии  $\Upsilon$ -мезонов, была измерена зависимость интенсивности

внутригусткового рассеяния в диапазоне энергии от 1.85 до 4 ГэВ. Нормированная на квадрат тока пучка интенсивность тушековских событий пропорциональна  $E^{-2}V^{-1}$ , где  $E$  — энергия а  $V$  — эффективный объем пучка.

**Пятая глава** посвящена процедуре калибровке энергии: получение поляризованного пучка, выбор оптимальных параметров деполяризатора и системы сбора данных, определение момента времени деполяризации и частоты деполяризатора. Проведён анализ статистических и систематических погрешностей однократной калибровки энергии. Точность однократной калибровки энергии составляет  $0.9 \times 10^{-6}$  (таблица 1). Достигнута предельная статистическая погрешность определения частоты спиновой прецессии  $2 \times 10^{-9}$ .

Таблица 1. Основные источники ошибки измерения энергии методом резонансной деполяризации.

Источник	Погрешность, эВ	Относительная погр.
Статистика	1000	$6.5 \times 10^{-7}$
Ширина спиновой линии	900	$5.8 \times 10^{-7}$
Масса электрона	50	$2.5 \times 10^{-8}$
Аномальный магнитный момент	0.4	$2.4 \times 10^{-10}$
Частота обращения	0.05	$2.5 \times 10^{-11}$
частота деполяризатора	0.05	$2.5 \times 10^{-11}$
Итого	1350	$8.7 \times 10^{-7}$

При калибровке энергии применяется компенсационная схема измерений с двумя одновременно циркулирующими в ускорителе густками. Один из них поляризованный, другой — неполяризованный. Радиационная поляризация пучка осуществляется в ускорителе ВЭПП-3, после чего поляризованный пучок перепускается в ВЭПП-4М. Нормировка скоростей счёта от поляризованного и неполяризованного густка позволяет подавить влияние нестабильности скорости счета, связанной с изменением размеров и орбиты пучка, в качестве нормировочного используются второй неполяризованный густок. Для исключения деполяризации на боковой спиновой гармонике ( $\pm 50$  Гц) использовалась частичная деполяризация с двумя калибровками энергии на одном поляризованном густке со сканированием в разных направлениях по частоте. Типичная калибровка энергии изображена на рис. 1.

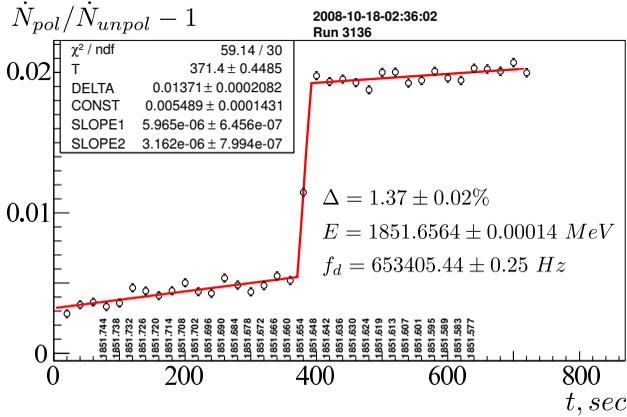


Рис. 1. Зависимость относительной разности скоростей счёта поляризованного и неполяризованного сгустков от времени. Момент деполаризации совпадает с моментом изменения скорости счёта поляризованного пучка. Приведена статистическая ошибка определения энергии. Подписи под точками показывают соответствующую частоте деполаризатора энергию в МэВ.

Знание разницы энергий электронов и позитронов, полученное методом резонансной деполаризации, чрезвычайно важно для прецизионного измерения масс узких резонансов. Поляриметр позволяет измерять энергию электронов и позитронов как по отдельности, так и одновременно. В разделе 5.5 описан эксперимент по сравнению энергий электронов и позитронов. Измеренная разница их энергий составляет около 1 кэВ.

**В шестой главе** описаны эксперименты по измерению масс  $J/\psi^-$ ,  $\psi(2S)^-$ ,  $\psi(3770)^-$ ,  $D^0^-$ ,  $D^+$ -мезонов и  $\tau$ -лептона, в которых использовалась система измерения энергии методом резонансной деполаризации.

В экспериментах по физике высоких энергий необходимо знать энергию пучка во время набора статистики, а калибровки энергии проводятся тогда, когда набор статистики не ведётся. Поэтому энергия пучка во время набора статистики определялась интерполяцией калибровок энергии с использованием параметров ускорителя: основного магнитного поля и поля корректоров, измеряемых методом ЯМР; температур кольца, стенок и воздуха тоннеля, охлаждающей воды; положения орбиты пучка. Достигнута точность восстановления энергии равная  $(8 \div 15) \cdot 10^{-6}$  ( $15 \div 30$  кэВ) в зависимости от режима работы ускорителя.

В эксперименте по измерению массы  $\tau$ -лептона в связи с невозможностью получить поляризованный пучок на энергии 1.7 ГэВ применялась специальная процедура калибровки энергии пучка. Поляризация и инжекция пучка осуществлялась на энергии 1.85 ГэВ, выше порога рождения  $\tau$ -лептона, затем энергия ВЭПП-4М понижалась до 1.78 ГэВ, где осуществлялась стандартная двукратная калибровка энергии (рис. 2).

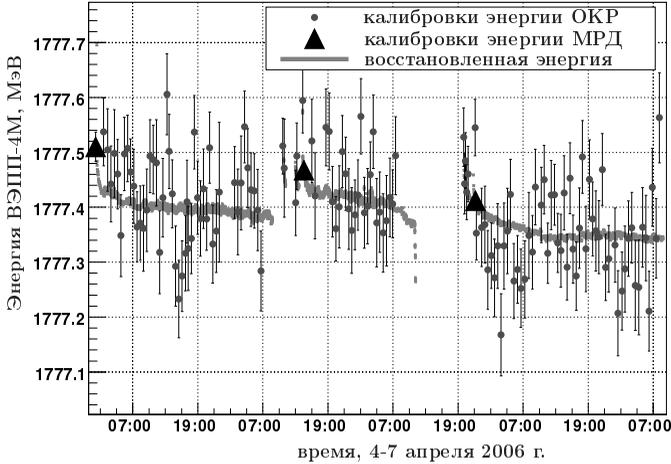


Рис. 2. Энергия ВЭПП-4М при работе на пороге рождения  $\tau$ -лептона. Изображена восстановленная энергия, энергия измеренная методом резонансной деполяризации (МРД) и энергия измеренная по обратному комптоновскому рассеянию (ОКР).

В результате проведённых экспериментов с лучшей в мире точностью измерены массы  $J/\psi$ -,  $\psi(2S)$ -,  $\psi(3770)$ -,  $D^+$ -мезонов и  $\tau$ -лептона.

**В заключении** перечислены основные результаты диссертации.

Создана высокоэффективная система регистрации рассеянных внутри сгустка (тушековских) электронов поляриметра ВЭПП-4М, предназначенная для прецизионного измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации.

Система позволяет измерять величину деполяризационного эффекта с рекордной достоверностью до 70 стандартных отклонений.

Высокая эффективность регистрации тушековских электронов дает возможность проводить многократные калибровки энергии на одном пучке и исключить потенциально опасные источники систематических ошибок в измерении энергии.

Точность однократной калибровки энергии составляет  $0.9 \times 10^{-6}$  (2 кэВ), что в несколько раз лучше точности достигнутой ранее методом резонансной деполяризации.

Впервые измерена интенсивность внутрисгусткового рассеяния в большом диапазоне энергий от 1.85 до 4 ГэВ.

Развита методика интерполяции энергии пучка ВЭПП-4М между калибровками энергии методом резонансной деполяризации с использованием измеряемых параметров ускорителя. Достигнута точность  $(8 \div 15) \cdot 10^{-6}$  ( $15 \div 30$  кэВ) в зависимости от режима работы ускорителя.

Проведён цикл прецизионных экспериментов с детектором КЕДР на ускорителе ВЭПП-4М, в которых для измерения энергии пучка использовался тушековский поляриметр. С лучшей в мире точностью в них измерены массы  $J/\psi^-$ ,  $\psi(2S)^-$ ,  $\psi(3770)^-$ ,  $D^+$ -мезонов и  $\tau$ -лептона.

**В приложении** приведены: расчёт влияния синхротронных колебаний на частоту прецессии спина; вывод формулы для интенсивности внутрисгусткового рассеяния в поляризованном пучке; поправки к скорости счёта при частоте срабатывания счётчика сравнимой с частотой обращения пучка.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

- [1] V. Blinov, A. Bogomyakov, I Nikolaev et al. Polarization measurement system on the VEPP-4 collider at low energy range. // Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference. - Beijing, China: 2001.
- [2] V. Blinov, A. Bogomyagkov, I Nikolaev et al. Linux based toolkit in the VEPP-4 control system. // Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS 2001). - San Jose, California, USA: 2001. - P. 334-336.
- [3] V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, I.B. Nikolaev et al. High-efficiency polarimeter based on intra-beam scattering. // 8th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2002). - Paris, France: 2002. - Jun. - P. 1954.
- [4] V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, I.B. Nikolaev et al. Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M. // Nucl. Instrum. Meth. - 2002. - Vol. A494, P. 81-85

- [5] V. M. Aulchenko, S.A Balashov, I.B Nikolaev et al. New precision measurement of the  $J/\psi$ - and  $\psi'$  - meson masses. // Phys. Lett. - 2003. - Vol. B573. - P. 63-79.
- [6] A. Bogomyagkov, S. Nikitin, I. Nikolaev et al. Research of Possibility to use Beam Polarization for Absolute Energy Calibration in High-precision Measurement of Tau Lepton Mass at VEPP-4M. // 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004). - - Lucerne, Switzerland: 2004. - 5-9 Jul.
- [7] K. Yu. Todyshev, V.V Anashin, I.B. Nikolaev et al. Precision measurements of masses of charmonium states. // Proceedings of Science. - 2006. - Vol. HEP2005. - P. 115.
- [8] S.A. Nikitin, I.B. Nikolaev. Dependence of the electron beam polarization effect in the intra-beam scattering rate on the vertical beam emittance. // Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC 06). - Edinburgh, Scotland: 2006. - - 26-30 Jun. - P. 1184-1186.
- [9] S Nikitin, I Nikolaev et al. Record-high resolution experiments on comparison of spin precession frequencies of electron bunches using the resonant depolarization technique in the storage ring. // European Particle Accelerator Conference (EPAC 06). - Edinburgh, Scotland: 2006. - P. 2787-2789 (THOBF103).
- [10] A. Bogomyagkov, V. Blinov, I. Nikolaev et al. Beam energy calibration in experiment on precise tau lepton mass measurement at VEPP-4M with KEDR detector. // European Particle Accelerator Conference (EPAC 06). - Edinburgh, Scotland: 2006. - 26-30 Jun. - P. 625-627.
- [11] A. Bogomyagkov, S Nikitin, I Nikolaev et al. Central Mass Energy Determination in High Precision Experiments on VEPP 4M. // Particle Accelerator Conference PAC07 Jun 2007,. - Albuquerque, New Mexico: 2007. - P. 63-65.
- [12] V. V. Anashin, V.M. Aulchenko, I.B. Nikolaev et al. Measurement of the tau lepton mass at the KEDR detector // JETP Lett. - 2007. - Vol. 85. - P. 347-352.
- [13] A. G. Shamov, V.V. Anashin, I.B. Nikolaev et al. Tau mass measurement at KEDR. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. - - 2008. - Vol. 181-182. - P. 311-313.

- [14] V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov, I. B. Nikolaev et al. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider: KEDR/VEPP-4M. // Nucl. Instrum. Meth. - 2009. - Vol. A598, no. 1. - P. 23–30.
- [15] V. Blinov, A. Bogomyagkov, I. Nikolaev et al. Study of the possibility of increasing the accuracy of CPT Invariance Test at electron-positron storage rings. // ICFA Beam Dynamics Newsletter. - - 2009. - Vol. 48. - P. 207-217.
- [16] A. G. Shamov, V. V. Anashin, I. B. Nikolaev et al. Tau mass measurement at KEDR. // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. - 2009. - Vol. 189. - P. 21–23. - 10th International Workshop on Tau Lepton Physics.
- [17] О.В. Anchugov, В.Е. Блинов, И.Б. Николаев и др. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. // ЖЭТФ. - 2009. - Т. 136, № 4. - С. 690-702.
- [18] С.А. Никитин, И.Б. Николаев. Расчёт интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М. // Препринт ИЯФ 2010-42. - 2010. - Т. 42.
- [19] V. V. Anashin, V. M. Aulchenko, I. B. Nikolaev et al. Measurement of  $D^0$  and  $D^+$  meson masses with the KEDR detector // Physics Letters B. - 2010. - Vol. 686, No. 2-3. - P. 84-90.
- [20] К.Ю. Korneliy, V.V. Anashin, I.B. Nikolaev et al. Measurement of  $\psi(3770)$  parameters with KEDR detector at VEPP-4M. // 35th International Conference of High Energy Physics. - Vol. ICHEP2010. - Paris, France: Proceedings of Science, 2010. - P. 218.
- [21] Vladimir Blinov, Vladimir Kiselev, Ivan Nikolaev et al. Measurement of The Energy Dependence of Touschek Electron Counting Rate. // Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference. - New-York, USA: 2011. - April. - P. MOP182.

НИКОЛАЕВ Иван Борисович

**Измерение энергии пучка ускорителя  
ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 27.04.2012 г.

Подписано в печать 28.04.2012 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 11

---

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН

*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*