

*На правах рукописи*

ЖУРАВЛЕВ Андрей Николаевич

РАЗВИТИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-4М

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Мешков  
Олег Игоревич – кандидат физико-математических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КООП  
Иван Александрович – доктор физико-математических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ЯКОВЕНКО  
Сергей Леонидович – кандидат физико-математических наук,  
Объединенный институт ядерных исследований,  
г. Дубна.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ: – Научно-исследовательский институт ядерной  
физики ГОУ ВПО «Томский политехнический  
университет», г. Томск.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.  
в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.03  
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Циклические ускорители на данный момент являются основными поставщиками результатов для физики элементарных частиц. Их энергия покрывает широкий диапазон от сотен МэВ до сотен ГэВ. С каждым годом становится все больше и больше накопителей, используемых как источники синхротронного излучения (СИ). Эти машины находят применение в различных областях как научной, так и прикладной деятельности.

Средства диагностика пучка – наши органы чувств, дающие возможность исследовать свойства и поведение пучка в ускорителе. Развитие диагностических методов позволяет увеличивать точность определения параметров пучка, оптимизировать режимы работы установки и получать востребованные и конкурентоспособные экспериментальные результаты. Здесь уместно высказывание: ускоритель хорош настолько, насколько хороша его диагностика.

Для повседневной эксплуатации установки требуется знание основных текущих параметров пучка. Важным условием проведения экспериментов со встречными пучками является большое время жизни частиц, поэтому применение контактных методов измерений зачастую практически исключено. Привлекательность оптической диагностики, использующей СИ, заключается в том, что она не оказывает никакого воздействия на объект исследования, и поэтому является очень востребованным способом получения необходимой информации о пучках заряженных частиц в ускорителях электронов и позитронов.

Для диагностических целей свет выводится из ускорителя и транспортируется к измерительному оборудованию посредством различных оптических элементов: окон, зеркал, линз и волоконных световодов. Приемниками излучения являются телекамеры, приборы с зарядовой связью, фотодиоды, фотомножители и другие оптические детекторы.

Применять оптическую диагностику начинают с первых же секунд работы ускорителя с пучком (проводка пучка по каналу или кольцу) и непрерывно используют в процессе работы ускорителя в рутинных измерениях основных параметров пучка. Полученная информация очевидна и очень полезна, например, можно следить за изменениями размеров пучка, током пучка, энергией и энергетическим разбросом пучка, можно измерять синхротронную и бетатронные частоты, поперечные профили пучка, длину сгустка.

Еще в первых теоретических работах по свойствам синхротронного излучения делались прогнозы по использованию СИ для измерений параметров пучка заряженных частиц. Особенно востребованной оптическая диагностика стала с появлением ускорителей со встречными пучками, когда для успешной эксплуатации установки понадобились системы непрерывного наблюдения и измерения параметров пучка.

В последнее время на комплексе ВЭПП-4 стали появляться новые приборы оптической диагностики, разработанные и созданные в Институте ядерной физики. В 2001 году для измерений положения и поперечных размеров пучка в непрерывном режиме начали использоваться ПЗС-камеры. В 2003 году на коллайдере ВЭПП-4М был введен в строй пооборотный профилометр. Уникальные свойства прибора позволяют применять его не только в рутинных измерениях параметров пучка, но и в разнообразных научных экспериментах по ускорительной физике. В 2006 году для точного измерения времени жизни пучка в широком динамическом диапазоне по току на комплексе ВЭПП-4 внедрили фотодиод, что позволило провести эксперименты по измерению динамической апертуры ускорителя. В 2008 году заработала многоточечная камера-обскура, позволяющая контролировать координату и вертикальный угол наклона пучка в экспериментальном промежутке.

В основу диссертации положена разработка новых приборов и методов оптической диагностики для измерения основных параметров пучков заряженных частиц в накопителях с использованием синхротронного излучения (СИ), а также эксперименты, где эти диагностики применялись.

### **Цель работы**

Глубокая модернизация существующей на комплексе ВЭПП-4М оптической диагностики с целью создания современного диагностического инструмента для измерения параметров пучков заряженных частиц в ускорителях электронов и позитронов.

### **Научная новизна**

- Впервые в мировой практике был спроектирован, изготовлен и введен в эксплуатацию быстрый профилометр (многоанодный ФЭУ). С помощью прибора оптической диагностики с пооборотным временным разрешением удастся регистрировать профиль пучка по вертикальной или горизонтальной координате в 16 точках на протяжении  $2^{17}$  оборотов.
- Предложен и осуществлен метод обнаружения фазовых колебаний пучка на раннем этапе их возникновения на основе многоанодного ФЭУ.
- Реализована система контроля пучка в экспериментальном промежутке на основе многоточечной камеры-обскуры.

## **Практическая значимость работы**

В результате данной работы была введена в эксплуатацию система оптической диагностики пучков заряженных частиц на комплексе ВЭПП-4М, позволяющая измерять следующие параметры пучка:

- Положение и размеры пучков электронов и позитронов.
- Ток пучка электронов в широком динамическом диапазоне от 10мкА до максимально возможного значения тока на ускорителе, и с точностью лучшей, чем у существующих на комплексе ВЭПП-4М измерителей тока.
- Частоты колебаний пучка в широком динамическом диапазоне от нескольких Гц до сотен КГц, что позволяет определять низкочастотный спектр колебаний пучка, синхротронную и бетатронные частоты.
- Профиль пучка на протяжении  $2^{17}$  оборотов с пооборотным временным разрешением.
- Положение и вертикальный угол наклона пучка в экспериментальном промежутке ВЭПП-4М.

Система обнаружения фазовых колебаний на раннем этапе их возникновения на основе многоанодного ФЭУ позволила увеличить надежность и стабильность режима набора статистики при работе на детектор КЕДР.

Полученные в работе результаты экспериментов по измерению динамической апертуры, энергетического разброса и пересечению бетатронного резонанса представляют интерес для физики ускорителей.

## **Апробация работы и публикации**

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на семинарах в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, РФ). Кроме того, результаты работ докладывались на XIX Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (Дубна, Россия, 2004), Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Люцерн, Швейцария, 2004), VII Европейском совещании по диагностики пучков в ускорителях заряженных частиц (Лион, Франция, 2005), XX Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (Новосибирск, Россия, 2006), Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Эдинбург, Шотландия, 2006), VII Европейском совещании по диагностики пучков в ускорителях заряженных частиц (Венеция, Италия, 2007), Азиатской конференции по ускорителям заряженных частиц (Индор, Индия, 2007), XXI Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (Звенигород, Россия, 2008), 11-й Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Генуя, Италия, 2008), 23-й конференции по ускорителям заряженных частиц (Ванкувер, Канада, 2009).

По материалам диссертации опубликовано более 20 работ.

## **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 46 наименований и содержит 94 страницы машинописного текста, включая 68 графиков и рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформулирована цель диссертационной работы. Раскрыта актуальность данной работы. Кратко изложена история развития оптической диагностики как на комплексе ВЭПП-4М, так и на более ранних ускорительных установках ИЯФ.

**В первой главе** в параграфе 1.1 приводится описание установки ВЭПП-4М, на котором расположена рассматриваемая в диссертации диагностика и проведены описываемые эксперименты. В параграфе 1.2 рассмотрены основные физические особенности синхротронного излучения, существенные для диагностических применений на комплексе ВЭПП-4. Приведены формулы и численные оценки основных параметров синхротронного излучения для комплекса ВЭПП-4М.

**Вторая глава** посвящена описанию приборов оптической диагностики, активно применяемых на комплексе ВЭПП-4 как для рутинных измерений основных параметров пучков электронов и позитронов, так и в специализированных экспериментах по физике ускорителей. Такими приборами диагностики являются ПЗС-камера, многоанодный ФЭУ, фотодиод, многоточечная камера-обскура и ф-диссектор.

В параграфе 2.1 описана ПЗС-камера, которая была разработана и изготовлена в Лаб.6 ИЯФ СО РАН. Для ее использования в качестве постоянно действующего диагностического инструмента на комплексе ВЭПП-4 требовалась паспортизация параметров ПЗС-камеры. Такие измерения были проделаны и их результаты приведены в этой главе.

В параграфе 2.2 представлен быстрый профилометр на основе многоанодного ФЭУ, позволяющий строить профиль пучка с поворотным временным разрешением (рис. 1.).

Многоанодный ФЭУ имеет 16 независимых анодов, чувствительность которых может отличаться друг от друга на величину до 30% (по паспорту). Также для этого прибора важна синхронизация с пролетом пучка, определяющая качество получаемых данных. Поэтому кроме характеристик и принципа работы профилометра также описана процедура выбора рабочей точки и измерение относительной чувствительности анодов.

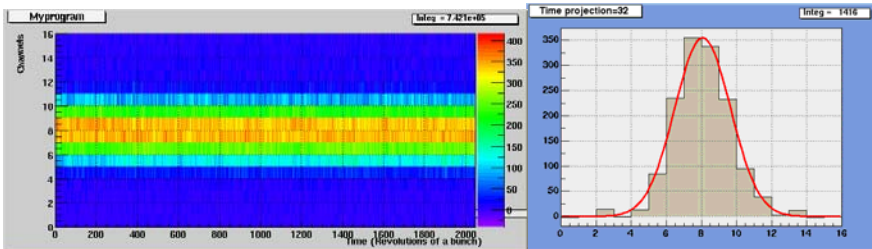


Рис. 1. Трехмерная картинка эволюции пучка во времени (на левом); поперечное распределение частиц в пучке (на правом).

В параграфе 2.3 приведено описание прибора на основе фотодиода S2387-33R HAMAMATSU и его основные характеристики. Фотодиод использовался для измерения изменений тока пучка в широком динамическом диапазоне и с точностью, превосходящей существующие на ВЭПП-4 электротехнические методы.

В параграфе 2.4 описана многоточечная камера-обскура, используемая для контроля орбиты пучка вблизи места встречи. Физические особенности устройства таковы, что работать камера может не на любой энергии коллайдера. Ограничение на энергию ускорителя включено в описание отдельной главой, наряду с принципом действия и оценкой точности измерений устройства.

В третьей главе разделение материала осуществлено по принципу «измеряемый параметр». Методы, основанные на применении перечисленных выше приборов оптической диагностики, предназначены для измерений

положения и размеров пучка; частот колебаний пучка; тока пучка; энергетического разброса пучка.

В параграфе 3.1 описаны измерения, связанные с определением положения и размеров пучков, а также их динамикой. На комплексе ВЭПП-4М существуют два оптических прибора, способных измерять положение и размеры пучка – это ПЗС-камера и многоанодный ФЭУ. Эти устройства, определяя по сути одни и те же параметры пучка, не конкурируют, а органично дополняют друг друга. С помощью ПЗС-камеры контролируется положение, вертикальные и горизонтальные размеры пучка (рис. 2).

С помощью многоанодного ФЭУ можно следить за изменением положения и размера пучка в одной плоскости (горизонтальной или вертикальной) с поворотным временным разрешением (рис. 3).

Таким образом, первая диагностика осуществляет «медленные», а вторая – «быстрые» измерения положения и размеров пучков. Контроль за положением пучка в экспериментальном промежутке производится при помощи многоточечной камерой-обскурой.

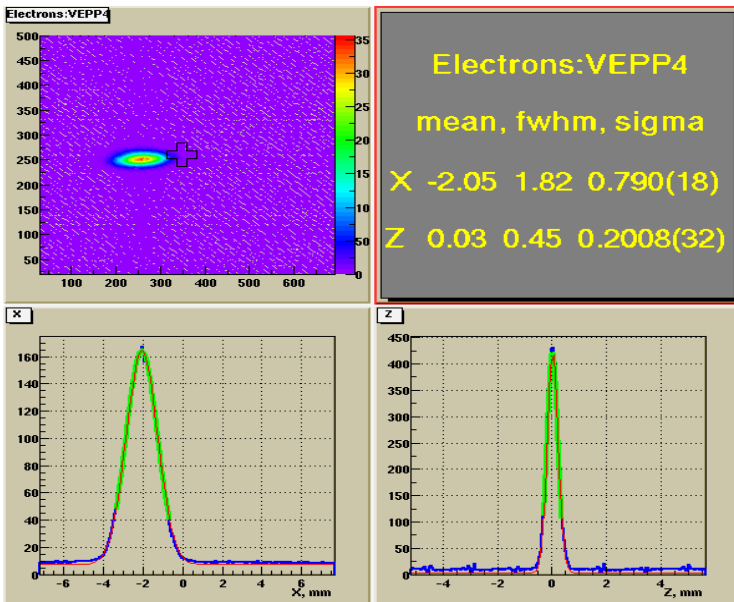


Рис. 2. Информационное окно ПЗС-камеры. Изображение пучка, построенное ПЗС-камерой и результат его обработки.

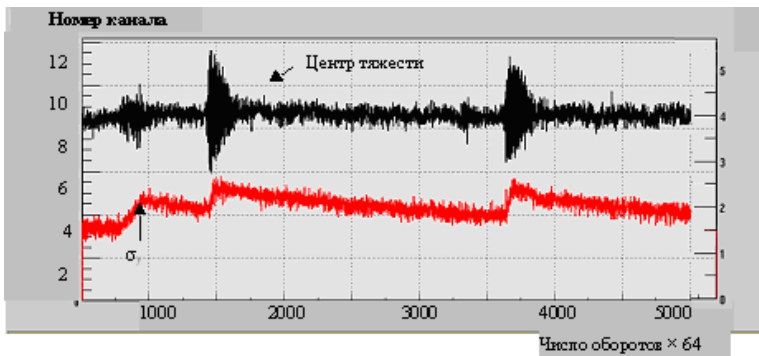


Рис. 3. Положение центра тяжести пучка (верхний график) и поведение размера пучка при сведении в месте встречи токов, ограниченных эффектами встречи.



В параграфе 3.2 представлены примеры использования многоанодного ФЭУ для измерений частот колебаний пучка (рис. 4).

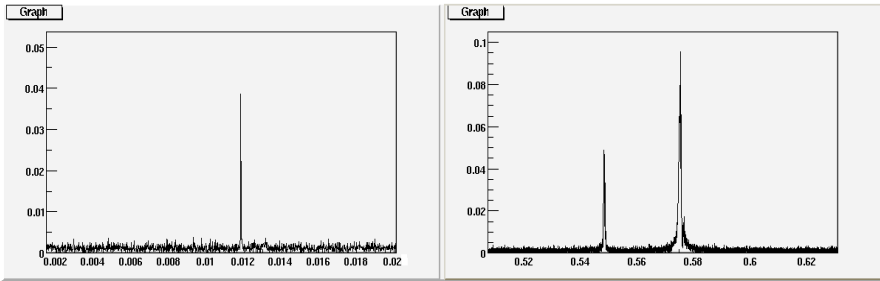


Рис. 4. Частоты колебаний пучка  $\nu_s = 0.012$ ,  $\nu_x = 0.547$ ,  $\nu_y = 0.575$ .

Возможности многоанодного ФЭУ позволяют вести наблюдение за пучком на протяжении отрезка времени от сотен миллисекунд до 20 секунд, а это, в свою очередь, дает возможность измерять частоты колебаний пучка от единиц Гц до сотен КГц. Таким образом, мы измеряем все возможные виды частот: бетатронные, синхротронную, а также низкочастотный спектр (от 10 до 400 Гц). Последний связан с пульсациями источников питания магнитной системы ускорителя.

В параграфе 3.3 описаны два метода измерения энергетического разброса пучка на комплексе ВЭПП-4М. Первый из них основан на появлении синхротронных спутников в спектре бетатронных колебаний пучка при увеличении хроматизма ускорителя. Энергетический разброс определяется из соотношения амплитуд синхротронных спутников и основного пика вертикальной бетатронной частоты (рис. 5).

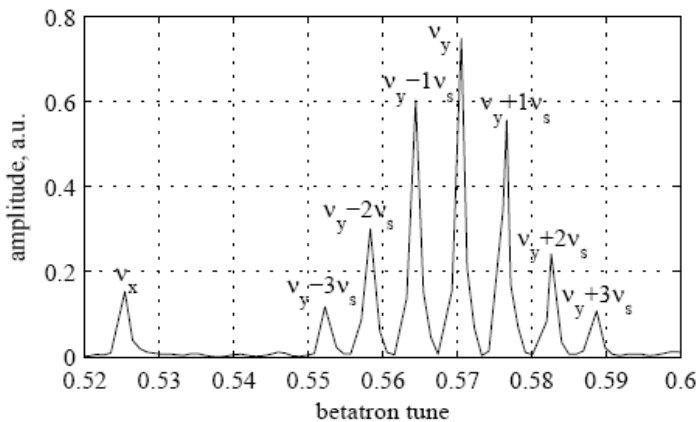


Рис. 5. Спектр вертикальных синхро-бетатронных колебаний.

Второй метод определения энергетического разброса основан на анализе формы огибающей бетатронных колебаний пучка, вызванных ударом кикера. Энергетический разброс определяется путем сравнения экспериментальных данных и теоретической кривой (рис. 6).

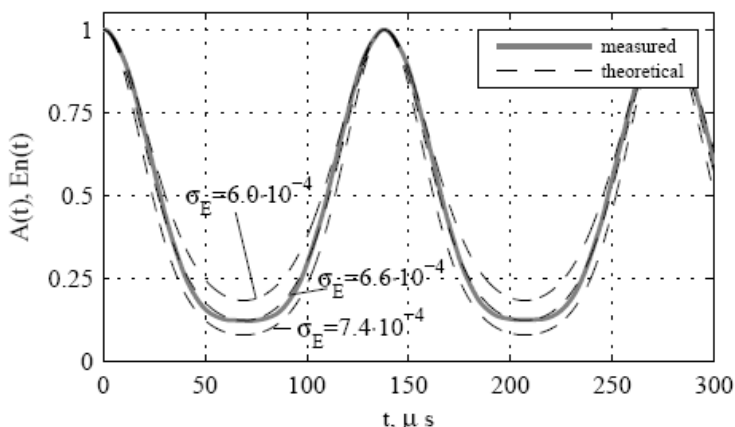


Рис. 6. Сравнение экспериментально определенной огибающей свободных бетатронных колебаний и теоретических кривых, соответствующих различным значениям энергетического разброса  $\sigma_E$ .

В параграфе 3.4 описаны эксперименты по измерению динамической апертуры ВЭПП-4М различными методами и в различных режимах работы ускорителя. Обычно динамическая апертура оценивается из результатов моделирования, что было проделано и в нашем случае. Но помимо этого, мы измерили ее экспериментально несколькими разными способами и сравнили полученные результаты между собой и с данными моделирования.

**В заключении** перечислены основные результаты работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту:

Модернизирована система оптической диагностики пучков заряженных частиц на комплексе ВЭПП-4М. В результате модернизации значительно расширился набор параметров пучков, регулярно определяемых при повседневной эксплуатации ускорителя. Появилась возможность проводить исследования по широкому кругу задач физики ускорителей.

**Основные результаты проделанной автором работы** состоят в следующем:

1. Введен в эксплуатацию быстрый профилометр (многоанодный ФЭУ). Впервые в мире удалось с помощью прибора оптической диагностики с поворотным временным разрешением зарегистрировать профиль пучка по 16 точкам на протяжении  $2^{17}$  оборотов.

2. Проведены измерения параметров ПЗС-камеры, позволившие использовать этот прибор в качестве постоянного диагностического инструмента на комплексе ВЭПП-4.

3. Реализована система контроля положения и угла наклона пучка в экспериментальном промежутке ВЭПП-4М на основе многоточечной камеры-обскуры.

4. Предложен и осуществлен метод обнаружения фазовых колебаний пучка на раннем этапе их возникновения, основанный на многоанодном ФЭУ.

5. Налажена методика измерения энергетического разброса пучка с помощью многоанодного ФЭУ.

6. Реализовано измерение несколькими методами динамической апертуры ВЭПП-4М, в том числе при помощи точного измерения времени жизни пучка.

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

1. A. V. Bogomyagkov, V. F. Gurko, A. N. Zhuravlev, P. V. Zubarev, V. A. Kiselev, O.I. Meshkov, N. Yu. Muchnoi, A. N. Selivanov, V. V. Smaluk. New fast beam profile monitor for electron-positron colliders. Rev. Sci. Instrum. 78, 043305 (2007).
2. O.I. Meshkov, S.A. Glukhov, V.F. Gurko, A.D. Khilchenko, V.A. Kiselev, E.B. Levichev, N.Yu. Muchnoi, P.A. Piminov, V.V. Smaluk, A.N. Zhuravlev, «New optical diagnostics of the VEPP-4M collider», (Novosibirsk, IYF) . 2008. 4pp. Published in Phys.Part.Nucl.Lett.5:601-6046, 2008.
3. V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, O.I. Meshkov, V.V. Smaluk, V.N. Zhilich and A.N. Zhuravlev, «Beam energy spread measurement at the VEPP-4M Electron-Positron Collider», JINST (Journal of Instrumentation) PUBLISHED: June 8, 2007.

4. S. Glukhov, V. Kiselev, E. Levichev, O. Meshkov, S. Nikitin, I. Nikolaev, P. Piminov, A. Zhuravlev. «Study of beam dynamics during crossing of resonance in the VEPP-4M storage ring» Beam Dynamics Newsletter, No.48, April 2009.
5. О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, А.В. Богомяков, А.Н. Журавлев, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселев, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков, С.И. Мишнев, Н.Ю. Мучной, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, В.В. Петров, П.А. Пиминов, Е.А. Симонов, С.В. Сияткин, А.Н. Скринский, В.В. Смалюк, Ю.А. Тихонов, Г.М. Тумайкин, А.Г. Шамоу, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов, Е.И. Шубин. «Физика пучков заряженных частиц на ускорительном комплексе ВЭПП-4». ЖЭТФ, принято к публикации.
6. В.Ф. Гурко, А.Н. Журавлев, П.В. Зубарев, А.Н. Квавшин, В.А. Киселев, О.И. Мешков, Н.Ю. Мучной, А.Д. Хильченко «Многоанодный ФЭУ для оптической диагностики пучка на коллайдере ВЭПП-4М.» Препринт ИЯФ 2004-81, Новосибирск 2004.
7. V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, O.I. Meshkov, V.V. Smaluk, V.N. Zhilich, A.N. Zhuravlev «Beam Energy Spread Measurement at the VEPP-4M Electron-Positron Collider» Препринт, Budker INP 2006-57, Novosibirsk 2006.
8. O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev, P.V. Zubarev, V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, N.A. Selivanov, V.V. Smaluk, A.D. Khilchenko «VEPP-4M optical beam profile monitor with one-turn temporal resolution.» Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, pp. 2733-2735.
9. O.I. Meshkov, A.V. Bogomyagkov, F. Gurko, A.N. Zhuravlev, P.V. Zubarev, V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, N.A. Selivanov, A.D. Khilchenko «Application of the beam profile monitor for VEPP-4M tuning», DIPAC 2005, Lyon, France.
10. Pavel Piminov, Sergey Glukhov, Evgeny Levichev, Oleg I. Meshkov, Sergei Nikitin, Ivan Nikolaev, Andrey N. Zhuravlev «Study of Beam Dynamics during the Crossing of the Third-Order Resonance at VEPP-4M», Proceedings of PAC09, Vancouver, 2009.
11. A.N. Zhuravlev, S.A. Glukhov, V.F. Gurko, A.D. Khilchenko, V.A. Kiselev, A.N. Kvashnin, E.B. Levichev, O.I. Meshkov, P.A. Piminov, V.V. Smaluk, P.V. Zubarev «The VEPP-4M dynamic aperture determination through the precise measurement of the beam lifetime», DIPAC 2007, Venice, Mestre, Italy.
12. O.I. Meshkov, A.N. Zhuravlev, « Multi-Pinhole Camera for Beam Position and Vertical Angle Stabilization», Proceedings of RUPAC08, Zvenigorod, 2008.
13. O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev, E.I. Zinin, P.V. Zubarev, N.Yu.

- Muchnoi, Yu.A. Pahotin, A.N. Selivanov, M.G. Fedotov, A.D. Khilchenko, «Optical diagnostic of the VEPP-4M collider», RuPAC XIX, Dubna 2004.
14. O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev, E.I. Zinin, P.V. Zubarev, N.Yu. Muchnoi, Yu.A. Pahotin, A.N. Selivanov, M.G. Fedotov, A.D. Khilchenko, «The upgraded optical diagnostic of the VEPP-4M collider», EPAC 2004, Lucerne, Switzerland.
  15. V.V. Zhilich, A. N. Zhuravlev, V. A. Kiselev, N. Yu. Muchnoi, V.V. Smaluk, S.V. Sinyatkin. «Direct comparison of the methods of beam energy spread determination in the VEPP-4M collider» Proceedings of DIPAC'07, Venice, Italy, 2007.
  16. V.A.Kiselev, N.Yu. Muchnoi, O.I.Meshkov, V.V.Smaluk, V.N.Zhilich, A.N.Zhuravlev, «Comparison of the methods for beam energy spread measurement at the VEPP-4M», Proc. of the APAC'2007, Indore, India, January 29 - February 2, 2007.
  17. V.Kiselev, O.I. Meshkov, V.V. Smaluk, A.N. Zhuravlev, «Beam Energy Spread Measurement at the VEPP-4M Electron-positron Collider», RuPAC 2006, Novosibirsk, September 10-14.
  18. O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev, V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, A.N. Selivanov, V.V. Smaluk, A.D. Khilchenko, «Study of beam energy spread at the VEPP-4M», EPAC 2006, Edinburgh, Scotland.
  19. O.I. Meshkov, V.V. Zhilich, A.N. Zhuravlev, V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, V.V. Smaluk, S.V. Sinyatkin, «Development of the methods of beam energy spread determination in the VEPP-4M collider», EPAC 2008, Genoa, Italy.
  20. V.A. Kiselev, E.B. Levichev, O.I. Meshkov, P.A. Piminov, D.N. Shatilov, V.V. Smaluk, A.N. Zhuravlev, «The VEPP-4 dynamic aperture determination with beam-beam effects» EPAC 2008, Genoa, Italy.

ЖУРАВЛЕВ Андрей Николаевич

**Развитие оптической диагностики пучков  
заряженных частиц на комплексе ВЭПП-4М**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор .17.11. 2009 г.

Подписано в печать 17.11. 2009 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.7 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 34

---

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