

На правах рукописи

РОМАНОВ Александр Леонидович

**НАСТРОЙКА ОРБИТЫ И ЭЛЕКТРОННО-
ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАКОПИТЕЛЯ
ВЭПП-2000 МЕТОДОМ МАТРИЦ ОТКЛИКОВ**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2011

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ШАТУНОВ — доктор физико-математических наук,
Юрий Михайлович профессор, член-корреспондент РАН,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПЕСТРИКОВ — доктор физико-математических наук,
Дмитрий Васильевич Учреждение Российской
академии наук Институт ядерной
физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ИВАНОВ — доктор физико-математических наук,
Сергей Владиславович член-корреспондент РАН,
ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”, г.Протвино.

ВЕДУЩАЯ — Объединённый институт ядерных исследо-
ОРГАНИЗАЦИЯ: ваний, г.Дубна.

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2011 г.
в “ _____ ” часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

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

Автореферат разослан « _____ » _____ 2011 г.

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

А. А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В конце 2006 года в ИЯФ СО РАН было завершено создание коллайдера ВЭПП-2000. С точки зрения ускорительной физики основной особенностью ВЭПП-2000 является реализация концепции круглых встречных пучков, которая позволяет существенно повысить пороговые токи и, соответственно, светимость. Для осуществления финальной фокусировки были выбраны сверхпроводящие соленоиды, использование которых создаёт сильную связь поперечных колебаний.

Одной из основных проблем при вводе ускорителя заряженных частиц в эксплуатацию является определение истинных значений параметров магнитной структуры. Эффективным методом для вычисления отклонений параметров электронно-оптической структуры ускорителя от проектных является анализ матрицы отклика орбиты. Она строится путём измерения значений смещения орбиты пучка на датчиках положения пучка (ДПП) при поочерёдном изменении всех корректирующих магнитов. Для нахождения истинных значений параметров магнитной структуры необходимо найти такую вариацию искоемых параметров, которая приводит к наилучшему согласию между экспериментальной и теоретической матрицами отклика.

Коллайдер ВЭПП-2000 рассчитан на работу с энергией пучка от 200 МэВ до 1000 МэВ. Бета-функции в местах встречи также могут варьироваться в пределах от 2 см на низких энергиях до 10 см на высоких. В процессе работы происходят частые перестройки по энергии сталкивающихся частиц, при этом необходимо постоянно поддерживать максимальный темп набора светимости. В связи с этим задачи по коррекции орбиты и электронно-оптической структуры ВЭПП-2000 являются в высшей степени актуальными.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы являлась автоматизация процедур коррекции орбиты и электронно-оптической структуры коллайдера ВЭПП-2000. Для этого были разработаны и интегрированы в систему автоматизации комплекса ВЭПП-2000 три специализированных алгоритма учитыва-

ющих сильную связь бетатронных колебаний в ВЭПП-2000. Первый алгоритм служит для измерения искажений орбиты относительно магнитных осей соленоидов и квадрупольей, а также для исправления найденных ошибок. Второй алгоритм позволяет находить такие изменения в теоретической модели ускорителя, которые наилучшим образом описывают экспериментально измеренные величины. Также в алгоритме предусмотрена процедура, позволяющая скорректировать запитывающие элементы токи. Для этого анализируются изменения параметров модели возникшие при подгонке. Третий алгоритм используется для оптимизации силы дипольных корректоров.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им непосредственно были разработаны и реализованы алгоритмы описанные в диссертации. Программа расчёта параметров циклических ускорителей в 6-ти мерном фазовом пространстве «sixdsimulation», являющаяся основой для разработанных методов, также была написана автором. Автор работы наряду с другими операторами регулярно применяет разработанные алгоритмы для поддержания выдающихся показателей коллайдера ВЭПП-2000. Автором лично были получены, представленные в диссертации экспериментальные данные, иллюстрирующие коррекцию электронно-оптической структуры, орбиты и оптимизацию токов в корректорах на коллайдере ВЭПП-2000.

Научная новизна

С научной точки зрения новым является успешное применение методов измерения и коррекции орбиты и электронно-оптической структуры, основанных на анализе матриц откликов для коллайдера ВЭПП-2000, реализующего концепцию круглых встречных пучков. Дополнительные сложности при решении поставленных задач, возникли из-за использования соленоидов в качестве элементов финальной фокусировки на ВЭПП-2000, которые создают сильную связь бетатронных колебаний.

Научная и практическая ценность

В результате проделанной работы, были разработаны и внедрены в систему автоматизации алгоритмы измерения и коррекции орбиты и электронно-оптической структуры, основанные на анализе матриц откликов. Регулярное использование данных процедур на ВЭПП-2000 позволило достичь рекордных показателей светимости для машин с двумя сталкивающимися пучками и получить максимальный параметр пространственного заряда $\xi = 0.15$.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка и реализация алгоритма автоматизированной коррекции равновесной орбиты ВЭПП-2000, в том числе в случае сильной связи бетатронных мод.
2. Разработка и реализация алгоритма автоматизированной коррекции электронно-оптической модели ВЭПП-2000, в том числе в случае сильной связи бетатронных мод.
3. Автоматизация алгоритма минимизации токов в корректорах ускорителя ВЭПП-2000.

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих конференциях и рабочих совещаниях:

11th European Particle Accelerator Conference (EPAC 08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy), 21th Russian Conference of on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2008, Звенигород, Россия), 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC'10, 2010, Kyoto, Japan), 22th Russian Conference of on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2010, Протвино, Россия), 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC2011, San Sebastian, Spain).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и одного приложения. Материал работы изложен на 72 страницах, включает 38

рисунков и список литературы, содержащий 22 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации рассмотрены методы вычисления базовых параметров циклических ускорителей в 6-ти мерном фазовом пространстве. Вводится ускорительная система координат; приводятся матрицы элементов; рассматривается воздействие дипольных корректоров в различных элементах на равновесную орбиту, а также её изменения вследствие неточности выставки отдельных элементов; приводится способ вычисления вторых моментов распределения частиц в пучке и других параметров, относящихся к линейной модели циклического ускорителя.

Во второй главе рассматриваются основные особенности нового накопителя ВЭПП-2000. Главные структурные элементы коллайдера ВЭПП-2000 отображены на рисунке 1. Кольцо ускорителя обладает двукратной зеркальной симметрией, имеет четыре относительно длинных пустых промежутка, используемых для впуска, установки ВЧ резонатора и двух детекторов. Жёсткая фокусировка обеспечивается одним семейством соленоидов финальной фокусировки (*S), тремя семействами фокусирующих квадрупольей (*F1, *f2 и *f3) и тремя семействами дефокусирующих квадрупольей (*d1, *d2 и *d3). Восемь 45° поворотных магнитов (семейства *M1 и *M2) организованы в четыре 90° ахроматических поворота (для первого квадранта это: 1M1 1d1 1f2 1d2 1M2).

Электронно-оптическая структура ВЭПП-2000 реализует идею «круглых» сталкивающихся пучков. Для осуществления этой задачи необходимо соблюдение следующих условий:

- Равные бета-функции в месте встречи.
- Равные набег фаз (их дробных частей) для обеих мод бетатронных колебаний.
- Равные эмиттансы.

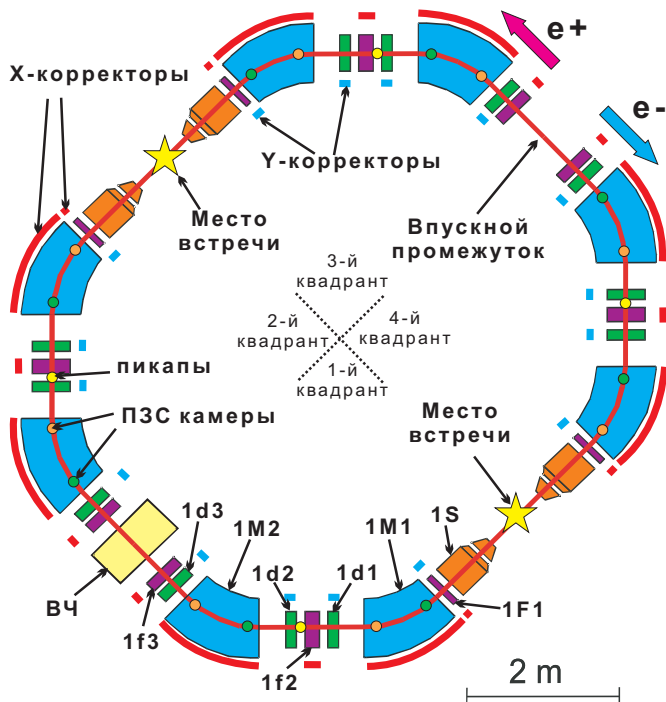


Рис. 1. Схематическое изображение кольца ВЭПП-2000.

При соблюдении этих условий матрица перехода между местами встречи становится блочно-диагональной, что приводит к сохранению углового момента ($M = xy' - yx' = const$). Равенство эмиттансов, при равных бета-функциях, делает пучки в месте встречи круглыми (отсюда и название конфигурации), поэтому удар от встречного пучка так же сохраняет этот интеграл движения.

Основные параметры ВЭПП-2000 на энергии 900 МэВ приведены в таблице 1. Стоит отметить, что бетатронные частоты могут быть изменены в пределах от целого резонанса до полуполого, однако, как показала практика, с точки зрения эффектов встречи наиболее удачные места расположены между резонансами $1/10$ и $1/5$.

Так же во второй главе описываются алгоритмы измерения и коррекции равновесной орбиты. Рассмотрим задачу о коррекции измеренных

| | | |
|--|--------------------------------|---------------------|
| Периметр, м | C | 24.388 |
| Частота ВЧ резонатора, МГц | f_0 | 172 |
| Напряжение на резонаторе, КВ | V | 100 |
| Номер гармоники ВЧ | q | 14 |
| Коэффициент удлинения орбиты | α | 0.036 |
| Синхротронная частота | ν_s | 0.003 |
| Бегатронные частоты | ν_x | 4.1 |
| | ν_y | 2.1 |
| Эмиттансы, см*рад | $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ | $2.2 \cdot 10^{-5}$ |
| Безразмерные декременты затухания | δ_x, δ_y | $2.3 \cdot 10^{-5}$ |
| | δ_s | $4.6 \cdot 10^{-5}$ |
| Энергетический разброс в пучке | σ_E | $6.4 \cdot 10^{-4}$ |
| Число частиц в пучке | e^-, e^+ | $1.0 \cdot 10^{11}$ |
| Количество сгустков в пучке | | 1 |
| Сдвиги частот от эффектов встречи | ξ_x, ξ_y | 0.075 |
| Светимость на место встречи $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ | L_{max} | $1.0 \cdot 10^{32}$ |

Таблица 1. Основные параметры коллайдера ВЭПП-2000 на энергии 900 МэВ

искажений орбиты $X_{exp,i}$ с помощью корректоров, сила которых описывается величинами V_j . Смещение орбиты в точках наблюдения можно представить в следующем виде:

$$\Delta X_i = K_{ij} V_j, \quad (1)$$

здесь K_{ij} – искажение замкнутой орбиты в датчике положения пучка (ДПП) под действием корректора V_j . Для вычисления искомой силы корректоров нужно найти матрицу обратную к K_{ij} , поскольку последняя, в общем случае, не является квадратной то для поиска псевдообратной к ней можно воспользоваться сингулярным разложением (singular values decomposition – SVD):

$$V_j = - (K_{ij})_{SVD}^{-1} \Delta X_{exp,i}. \quad (2)$$

После этого приведён алгоритм измерения и коррекции искажений электронно-оптической модели циклического ускорителя. Суть исполь-

зуюемого метода коррекции заключается в том, чтобы варьируя параметры ускорителя в теоретической модели минимизировать разницу между расчётными и экспериментально измеренными величинами. В качестве функции цели выступает величина χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(V_{\text{exp},j} - V_{\text{mod},j})^2}{\sigma_j^2} = \sum_j \Delta \tilde{V}_j^2, \quad (3)$$

здесь $V_{\text{exp},j}$ – экспериментально измеренные параметры; $V_{\text{mod},j}$ – те же параметры, рассчитанные из модели; σ_j – точность соответствующего измерения;

Если считать, что вариации параметров P_i будут достаточно малы, то изменение параметров $V_{\text{mod},j}$ рассчитанных из модели можно представить в следующем виде:

$$\frac{\Delta V_j}{\sigma_j} = \frac{\mathfrak{M}_{ij}}{\sigma_j} \Delta P_i = \tilde{\mathfrak{M}}_{ij} \Delta P_i \quad (4)$$

Для улучшения согласия между расчётными и измеренными величинами изменение параметров ΔP_i должно аннулировать разницу $\Delta \tilde{V}_j$. Вычислив, с использованием SVD, матрицу псевдообратную к $\tilde{\mathfrak{M}}_{ij}$ получаем:

$$\Delta P_i = \left(\tilde{\mathfrak{M}}_{ij} \right)_{SVD}^{-1} \Delta \tilde{V}_j \quad (5)$$

На практике количество измеримых параметров много больше чем количество подгоночных параметров, поэтому матрица \mathfrak{M}_{ij} является прямоугольной и её прямое обращение невозможно, в этом случае можно воспользоваться приближёнными вычислениями, например методом SVD (разложение по сингулярным числам).

В третьей главе приводятся характеристики системы наблюдения за пучком на ВЭПП-2000 и системы коррекции орбиты и оптики; описана программа «bdsimulation», используемая для расчётов линейных параметров циклических ускорителей; приведены подробные описания алгоритмов коррекции орбиты и электронно-оптической структуры накопителя ВЭПП-2000 а также результаты их применения на практике.

Одним из самых удачных примеров важности разработанного метода коррекции электронно-оптической структуры ВЭПП-2000 является его применение при наборе статистики на энергии 900 МэВ в сезоне 2010-2011гг. Это был первый заход на этой энергии, все остальные заходы в

сезоне были на меньшей энергии. Чтобы подняться на 900 МэВ оператор загрузил структуру для работы на 875 МэВ, после чего было произведено необходимое количество повторений следующих действий:

- пропорциональное увеличение токов во всех элементах на небольшую величину
- коррекция рабочей точки

После достижения энергии 900 МэВ оператор в ручную произвёл грубую подстройку. Из-за заниженных токов в соленоидах и отсутствия корректного учёта эффектов насыщения магнитопроводов возникшая конфигурация очень плохо соответствовала идеальной модели.

Для исправления электронно-оптической структуры было произведено три последовательные коррекции электронно-оптической структуры основанные на анализе МО на дипольные корректоры, дисперсии и рабочей точки.

| | Поправка 1 (в %) | | Поправка 2 (в %) | | Поправка 3 (в %) | |
|-----|--|--|--|--|--|--|
| | $\frac{\langle \Delta I \rangle}{I_0}$, | $\frac{\langle \langle \Delta I \rangle - \Delta I \rangle}{I_0}$, | $\frac{\langle \Delta I \rangle}{I_0}$, | $\frac{\langle \langle \Delta I \rangle - \Delta I \rangle}{I_0}$, | $\frac{\langle \Delta I \rangle}{I_0}$, | $\frac{\langle \langle \Delta I \rangle - \Delta I \rangle}{I_0}$, |
| sol | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F1 | -1.97 | 4.35 | -8.47 | 0.31 | 0.45 | 0.30 |
| d1 | -10.81 | 1.54 | -22.03 | 2.23 | -4.02 | 0.59 |
| f2 | 0.28 | 0.46 | -1.06 | 0.05 | -0.41 | 0.21 |
| d2 | 2.60 | 0.49 | 2.41 | 0.51 | 0.76 | 0.43 |
| d3 | 3.33 | 0.27 | 1.69 | 0.36 | 0.83 | 0.17 |
| f3 | 2.57 | 0.81 | 0.65 | 0.31 | 0.67 | 0.67 |

Таблица 2. Поправки к токам линз и соленоидов в трёх последовательных коррекциях

В таблице 2 приведены средние поправки к токам в семействах линз и соленоидов, для трёх последовательных коррекций произведённых на энергии 900 МэВ. По этой же причине ток в соленоидах при вариациях модели был зафиксирован. Тот факт, что во второй итерации поправки к токам больше чем в первой итерации объясняется количеством сингулярных чисел использованных при обращении матрицы \mathfrak{M}_{ij} (5).

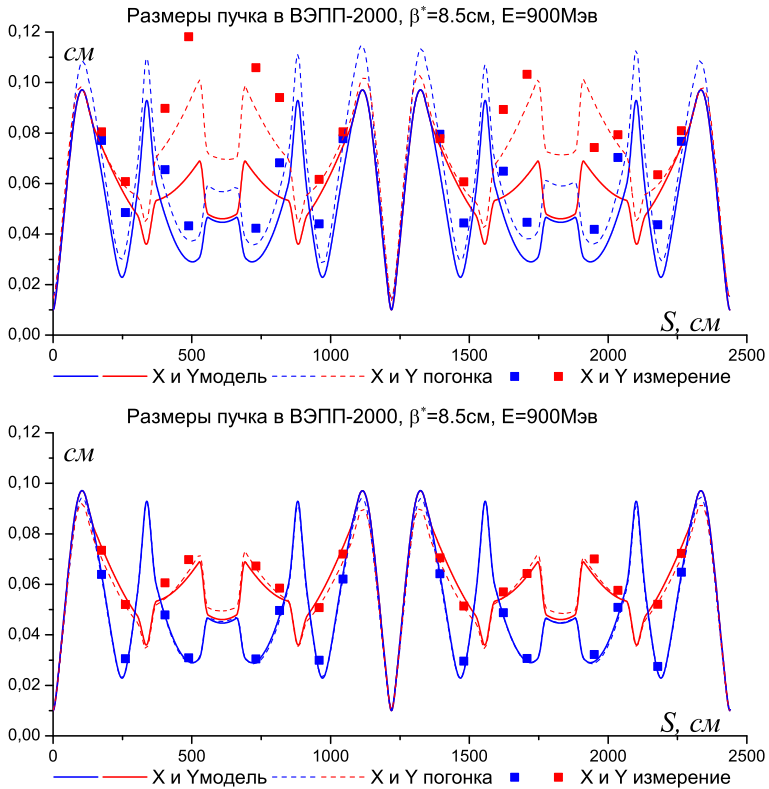


Рис. 2. Размеры пучков до и после коррекции оптики на энергии 900 МэВ

На рисунке 2 изображены две группы графиков отображающих состояние размеров пучков до и после поправок. На графиках изображены размеры вдоль кольца для идеального состояния, размеры вычисленные из модели которая была подогнана под экспериментальные данные и экспериментально измеренные размеры. Поскольку в качестве экспериментальных данных использовались отклики на дипольные корректоры, бетатронные частоты и дисперсия, то измеренные размеры можно рассматривать как независимые измерения с помощью которых можно протестировать правдоподобность структуры, полученной после подгонки. Как видно из графиков, в начальном состоянии реальные размеры очень

сильно отличаются от расчётных, но после внесения серии поправок размеры становятся почти идеальными. Несмотря на эффективность автоматизированной коррекции, последний этап настройки, включающий в себя тонкий подбор рабочей точки и максимальную компенсацию связи вне экспериментальных промежутков, осуществляется оператором вручную.

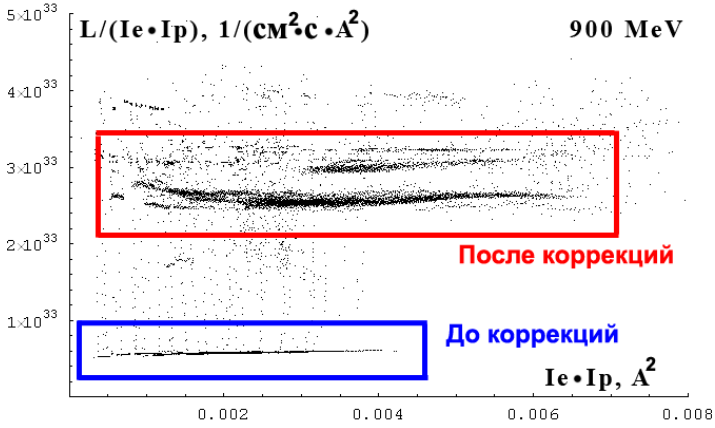


Рис. 3. Удельная светимость в заходе на 900 МэВ

Коррекция электронно-оптической структуры ВЭПП-2000 после подъёма на 900 МэВ увеличила удельную светимость примерно в четыре раза. На рисунке 3, изображающем удельную светимость в заходе на 900 МэВ, хорошо выделяются две группы точек: одна на уровне удельной светимости $0.6 \cdot 10^{33} (cm^2 \cdot s \cdot A^2)^{-1}$, и другая на уровне $2.8 \cdot 10^{33} \cdot (cm^2 \cdot s \cdot A^2)^{-1}$. Первая группа соответствует данным до поправок, вторая группа соответствует набору основной части интеграла светимости, произведённого после коррекции оптики.

В Заключение приводятся основные результаты и выводы диссертации.

В Приложении приведено краткое описание сингулярного разложения матриц.

Основные результаты работы

В ходе выполнения данной работы была собрана и систематизирована информация необходимая для вычисления базовых параметров циклических ускорителей в 6-ти мерном фазовом пространстве. Для описания циклических ускорителей используется матричный формализм, в котором каждому элементу ставится в соответствие матрица. В ходе написания вычислительной программы были перепроверены матрицы для всех основных элементов, а также вектора возмущений описывающие действия дипольных корректоров. Был разработан метод описания воздействия смещений элементов на замкнутую орбиту.

Для коррекции орбиты и электронно-оптической структуры ВЭПП-2000 были разработаны специальные алгоритмы учитывающие такие особенности структуры, как сильная связь бетатронных колебаний. Данные алгоритмы были интегрированы в систему автоматизации ВЭПП-2000. Коррекция орбиты и электронно-оптической структуры ВЭПП-2000 с использованием реализованных процедур позволила достичь рекордных показателей светимости для машин с двумя сталкивающимися пучками и получить максимальный параметр пространственного заряда $\xi = 0.15$.

Основные результаты диссертации

опубликованы в следующих работах:

- [1] *Романов А. Л.* Использование матрицы отклика для определения параметров магнитной структуры ускорителей // *Вестник НГУ.* 2007. Т. 2, № 3. С. 58–61.
- [2] *Shatunov Y. M., ..., Romanov A. L. et al.* VEPP-2000 Electron-Positron Collider Commissioning and First Results of Round Colliding Beam Tests. — EPAC'08, 11th European Particle Accelerator Conference, 23-27 June 2008, Genoa, Italy.
- [3] *Romanov A. L. et al.* Correction the Round Beam Lattice of VEPP-2000 Collider Using Orbit Response Technique. — EPAC'08, 11th European Particle Accelerator Conference, 23- 27 June 2008, Genoa, Italy.

- [4] *Berkaev D. E., ..., Romanov A. L. et al.* Status and progress VEPP-2000. — 21st Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 08), Zvenigirod, Russia, 2008. *Zvenigirod 2008, Particle accelerator* 70-73.
- [5] *Romanov A. L. et al.* Correcting the round beam lattice of VEPP-2000 collider using orbit response technique. — 21st Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 08), Zvenigirod, Russia, 2008. *Zvenigirod 2008, Particle accelerator* 64-66.
- [6] *Berkaev D. E., ..., Romanov A. L. et al.* VEPP-2000 electron-positron collider commissioning // *ICFA Beam Dyn. Newslett.* — 2009. — Vol. 48. — Pp. 34–37.
- [7] *Achasov M. N., ..., Romanov A. L. et al.* First experience with SND calorimeter at VEPP-2000 collider. — *Nucl.Instrum.Meth.A598:31-32,2009.*
- [8] *Berkaev D.E., ..., Romanov A. L. et al.* First commissioning results of VEPP-2000 // *ICFA Beam Dyn. Newslett.* — 2009. — Vol. 48. — Pp. 235–242.
- [9] *Shwartz D. B., ..., Romanov A. L. et al.* Present status of VEPP-2000 // *ICFA Beam Dyn. Newslett.* — 2010. — Vol. 53. — Pp. 28–39.
- [10] *Shwartz D. B., ..., Romanov A. L. et al.* Present Status of VEPP-2000. — 22 Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 10), Reotvino, Russia, 2010.
- [11] *Rogovsky Y. A., ..., Romanov A. L. et. al* Beam measurements with visible synchrotron light on VEPP-2000 collider. — 22 Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 10), Reotvino, Russia, 2010.
- [12] *Romanov A. L. et. al* Round beam lattice correction using response matrix at VEPP-2000. — IPAC'10, 1st International Particle Accelerator Conference, 23- 28 May 2010, Kyoto, Japan.
- [13] *Shatunov Y. M., ..., Romanov A. L. et al.* Round beam collisions at VEPP-2000 Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain. 2011.

РОМАНОВ Александр Леонидович

**Настройка орбиты и электронно-оптической
структуры накопителя ВЭПП-2000 методом
матриц откликов**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 2.04.2010 г.

Подписано в печать 5.04.2010 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 12

Обработано на IBM PC и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.