

На правах рукописи

ПИМИНОВ Павел Алексеевич

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
НЕЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ
В ЦИКЛИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2010

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛЕВИЧЕВ — доктор физико-математических наук,
Евгений Борисович Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

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

КОРЧУГАНОВ — доктор физико-математических наук,
Владимир Николаевич Курчатовский центр синхротронного
излучения и нанотехнологий
РНЦ “Курчатовский институт”, г. Москва.

ВЕДУЩАЯ — Объединённый институт ядерных
ОРГАНИЗАЦИЯ: исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2010 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 « _____ » _____ 2010 г.

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

А. А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современные тенденции развития циклических ускорителей заряженных частиц неизбежно ведут к возрастанию роли нелинейных эффектов. Увеличение яркости источников синхротронного излучения требует уменьшения поперечного фазового объема пучка, минимизация которого достигается за счет использования специальных магнитных структур, а также постановки магнитов со знакопеременным полем (змеек). Это приводит к увеличению жесткости магнитной структуры, к усилению хроматических эффектов и компенсирующего их секступольного возмущения. В результате оптика становится более нелинейной, увеличиваются ширины нелинейных резонансов, уменьшается динамическая область устойчивости и так далее. Одно из последних и интересных предложений по повышению светимости в циклических коллайдерах для физики высоких энергий является использование новой схемы столкновений «crab waist», благодаря которой удастся существенно уменьшить бета-функцию в месте встречи. Это однозначно ведет усилению нелинейных эффектов. Требуются специальные схемы компенсации нелинейного возмущения в таких системах. Кроме того, в таких коллайдерах необходимо учитывать нелинейность магнитной структуры при изучении эффектов встреч и расчете светимости. В накопителях-охладителях будущих линейных коллайдерах плотность частиц в сгустке достигает таких величин, что, несмотря на ультрарелятивистские энергии частиц, становится существенным эффект пространственного заряда. Сложность заключается еще и в том, что этот эффект возникает на конечной стадии затухания, когда фазовый объем пучка сжимается до малых значений. Это приводит к потере интенсивности, деградации параметров пучка и т.д.

Таким образом, нелинейные эффекты в будущих циклических ускорителях играют ключевую роль; являются одним из главных факторов, ограничивающих получение требуемых параметров. Поэтому требуется уметь рассчитывать такие системы; моделировать движения частиц в них; оптимизировать параметры и минимизировать влияние нелинейных полей.

Как правило, практически значимые аналитические оценки для изучения нелинейного движения частиц в таких ускорителях оказываются

ся невозможны или дают слишком грубый ответ. Поэтому наиболее доступным и надежным способом исследования и оптимизации нелинейных эффектов является численное моделирование. При этом моделирование должно реалистично (с требуемой точностью) описывать исследуемую систему, иметь возможность «включать» или «выключать» то или иное возмущение, что существенно облегчает анализ всей системы и позволяет получить представление о протекающих процессах.

Цель работы

Целью настоящей работы являлось:

1. Разработка методов и алгоритмов расчета параметров циклических ускорителей и моделирования движения заряженной частицы в них.
2. Создание симплектического метода интегрирования уравнений движений в произвольных магнитных полях, в том числе в полях вигглеров и ондуляторов.
3. Разработка алгоритмов численной оптимизации динамической апертуры в циклических ускорителях.
4. Поиск и компенсация основных источников нелинейного возмущения для «stab waist» коллайдеров.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автором лично были разработаны алгоритмы и реализованы все программы. Также автором были проведены расчеты и выполнено моделирование, результаты которого изложены в диссертации. Кроме того, автор принимал участие в подготовке, проведении и обсуждении результатов экспериментов по динамике пучков на коллайдере *ВЭПП-4М*, представленных в диссертационной работе.

Научная новизна

1. Разработан простой, быстрый и эффективный интегратор уравнений движений в магнитных полях со сложным распределением в пространстве. Интегратор позволяет моделировать движение частицы в магнитных полях вигглеров и ондуляторов, используемых для генерации синхротронного излучения.

2. Разработан оригинальный и эффективный метод оптимизации динамической апертуры, который может применяться для различного типа нелинейного возмущения.
3. Впервые предложен оригинальный способ коррекции aberrаций третьего порядка для системы секступольных линз, размещенных через -I преобразование, с помощью слабых секступолей.
4. Для нелинейного края квадрупольной линзы систем финального фокуса предложен метод компенсации с помощью семейств октупольных линз.

Практическая ценность проведенных исследований

Разработанные методики, позволяют численно изучать движение частиц в циклических ускорителях, получать и анализировать различную информацию, недоступную из эксперимента, что является необходимым для оптимизации работы действующих установок и проектирования будущих ускорителей. Алгоритмы численной оптимизации, позволяют увеличивать динамическую апертуру накопителей — одной из наиболее важных характеристик движения частиц в циклических ускорителях. Предложенные схемы компенсации нелинейного возмущения систем финального фокуса позволяют реализовать концепцию «crab waist», которая на сегодня является основным способом повышения светимости в современных коллайдерах.

На защиту выносятся следующие положения

1. Разработка программы для моделирования движения заряженной частицы в циклическом ускорителе и каналах транспортировки.
2. Создание простого и быстрого симплектического интегратора, позволяющего моделировать движение частицы в магнитных полях с произвольным распределением, в том числе в полях вигглеров и ондуляторов.
3. Разработка эффективного метода оптимизации динамической апертуры, энергетического акцептанса и других параметров нелинейного движения частиц в циклических ускорителях.
4. Разработка метода «лучших» секступольных пар, использующегося для поиска начального приближения при оптимизации динамической апертуры.

5. Разработка эффективного способа коррекции aberrаций, вызванных ненулевой длиной секступолей в широко используемой при компенсации хроматизма системы из двух секступолей, разделенных минус-единичной матрицей.
6. Разработка схемы компенсации нелинейного возмущения третьего порядка, создаваемого краевым полем квадрупольной линзы с помощью октупольных линз.

Апробация работы и публикации

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (Новосибирск), Объединенный европейский центр ядерных исследований CERN (Женева, Швейцария), Лаборатория ядерных исследований LNF INFN (Фраскати, Италия), Национальная лаборатория физики высоких энергий КЕК (Цукуба, Япония). Положения диссертации представлялись на российских и международных конференциях и совещаниях, включая: XVIII совещание по ускорителям заряженных частиц (Обнинск, Россия, 2002), European Particle Accelerator Conference EPAC'02 (Paris, France, 2002), Asian Particle Accelerator Conference APAC'04 (Gyeongju, Korea, 2004), European Particle Accelerator Conference EPAC'04 (Lucerne, Switzerland, 2004), Particle Accelerator Conference PAC'05 (Knoxville, Tennessee, USA, 2005), XIX International Workshop on Charged Particle Accelerators (Alushta, Crimea, 2005), European Particle Accelerator Conference EPAC'06 (Edinburgh, Scotland, UK, 2006), Particle Accelerator Conference PAC'07 (Albuquerque, New Mexico, USA, 2007), Workshop on Interaction Regions IR'07 (Frascati, Italy, 2007), European Particle Accelerator Conference EPAC'08 (Genoa, Italy, 2008), International Workshop on e^+e^- Collisions from ϕ to ψ (Frascati, Italy, 2008), 40th Advanced Beam Dynamics Workshop on e^+e^- Factories (Novosibirsk, Russia, 2008), Particle Accelerator Conference PAC'09 (Vancouver, Canada, 2009).

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 104 наименований, изложена на 182 страницах машинописного текста, содержит 131 рисунок и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дается обзор тенденций развития современных циклических ускорителей, рассматриваются основные проблемы нелинейного движения, которые могут ограничивать получение требуемых параметров. Приводится обоснование необходимости моделирования нелинейных динамических процессов в накопителях, дается краткое описание программы *Acceleraticum*, ее основных задач и ключевых особенностей. Также во Введении содержится краткий обзор развития программ для расчета и моделирования циклических ускорителей. В конце приводятся основные положения, которые выносятся на защиту диссертации.

Глава 1 посвящена подходам для моделирования движения заряженной частицы в циклическом ускорителе, использованном в *Acceleraticum*, дается описание ее программной реализации. Дается описание входного файла, который используется для задания входных данных, необходимых для работы программы. Рассматриваются физические элементы и эффекты, которые могут исследоваться с помощью программы. Приводятся примеры ее использования, вычисления различных параметров. Делается ее сравнение с другими программами, наиболее популярными в мире.

В **Главе 2** рассматриваются возможности программы при изучении магнитов со сложной конфигурацией поля — вигглеров и ондуляторов — на динамику частиц в накопителях. Дается описание простого и быстрого симплектического интегратора для произвольного распределения магнитного поля, реализованного для интегрирования уравнений движений в таких устройствах. Приводится вывод отображения, построенного на каноническом преобразовании координат. Уделено внимание восстановлению магнитного поля в пространстве на основе магнитных измерений и 3D расчета поля. Во второй части главы рассматривается практическое применение этих методов, где изучается влияние вигглера с сильным полем и эллиптических ондуляторов на динамику движения частиц в источнике синхротронного излучения *ALBA*.

В **Главе 3** исследуется совместное влияние нелинейности фокусирующей системы циклического ускорителя и пространственного заряда сопутствующего и/или встречного сгустков на тестовую частицу. Уделяется внимание моделированию пространственного заряда в циклических ускорителях. Во второй части главы приводятся практические примеры

использования программы. Рассматривается влияние пространственно заряда на динамику затухания в накопителе-охладителе линейного коллайдера *CLIC*. Исследуется влияние нелинейностей магнитного поля на эффекты встречи в электрон-позитронном коллайдере DAΦNE, в котором была реализована «stab waist» схема — современная технология увеличения светимости. Делается сравнения результатов моделирования и измерений, полученных из эксперимента.

Глава 4 сосредоточена на проблеме оптимизации динамической апертуры в циклических ускорителях. В начале главы делается обзор основных источников нелинейного возмущения ограничивающих динамическую апертуру. Затем исследуется влияние мультипольных ошибок высокого порядка и сильной синхротронной связи на динамическую апертуру циклических ускорителей. Далее приводятся описания метода оптимизации динамической апертуры. Дается описание метода «лучших пар», который позволяет корректировать натуральный хроматизм, обеспечивая при этом достаточно большую динамическую апертуру. Практическое применение метода рассматривается на примере источника синхротронного излучения *ALBA*, обладающего большим числом секступольных семейств. Далее, исследуется проблема оптимизации динамической апертуры в коллайдерах с «stab-waist» методом встречи. Рассматривается оригинальный способ коррекции аббераций третьего порядка для системы секступольных линз, размещенных через $-I$ преобразование, с помощью слабых секступолей. Для нелинейного края квадрупольной линзы систем финального фокуса исследуется компенсация с помощью семейств октупольных линз.

Глава 5 посвящена сравнению результатов использования программы *Acceleraticum* с экспериментальными данными по изучению нелинейных эффектов в накопителе *ВЭПП-4М*. В начале главы дается описание электрон-позитронного коллайдера *ВЭПП-4М*. Затем приводятся сравнения результатов расчета программы *Acceleraticum* с экспериментальными данными наиболее важных характеристик движения частиц. Исследуется динамика частиц вблизи нелинейных резонансов связи, возбуждаемые секступольными линзами. Приводятся результаты эксперимента по пересечению нелинейного резонанса $3\nu_z$ пучком частиц.

И, наконец, в **Заключении** перечислены основные результаты работы.

В **Приложении А** дается вывод степенного разложения векторного потенциала. Приводятся формулы для определения степенных коэффициентов через магнитные мультипольные коэффициенты.

В **Приложении Б** описываются способы построения эквивалентных моделей вигглеров, с помощью которых удастся правильно оценить влияние таких устройств на оптику накопителя и радиационные параметры пучка.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработана программа *Acceleraticum* для моделирования движения заряженной частицы в циклическом ускорителе и каналах транспортировки. Реализованы алгоритмы, позволяющие исследовать и оптимизировать различные параметры нелинейного движения. Выполнено сравнение результатов расчетов программы с другими ускорительными программами.
2. Для изучения движения в периодических магнитных полях создан простой и быстрый симплектический интегратор, позволяющий моделировать движение частицы в магнитных полях с произвольным распределением, в том числе в полях вигглеров и ондуляторов.
3. Разработан эффективный метод оптимизации динамической апертуры, энергетического акцептанса и других параметров нелинейного движения частиц в циклических ускорителях. Преимуществом разработанного метода является его независимость от типа нелинейного возмущения и модели структуры ускорителя. Метод хорошо зарекомендовал себя при оптимизации динамической апертуры как для сильно-, так и для слабопериодических магнитных структур.
4. Для поиска начального приближения при оптимизации динамической апертуры разработан оригинальный метод «лучших» секступольных пар, позволяющий компенсировать натуральный хроматизм, обеспечивая при этом достаточно большую динамическую апертуру.
5. Для широко используемой при компенсации хроматизма системы из двух секступолей, разделенных $-I$ матрицей, предложен эффективный способ коррекции аббераций, вызванных ненулевой длиной секступолей, с помощью слабых секступолей.

6. Предложена схема компенсации нелинейного возмущения третьего порядка, создаваемого краевым полем квадрупольной линзы с помощью октупольных линз. Подобное решение полезно если краевое поле квадрупольных линз имеет доминирующее влияние на ограничение динамической апертуры.
7. Осуществлена интеграция программ *Acceleraticum* и *LIFETRAC*, позволяющая осуществлять совместное моделирование влияния нелинейности магнитного поля и пространственного заряда на динамику пучка. Результатом такого моделирования стало обнаружение деградации распределения частиц в накопителе-охладителе линейного коллайдера в процессе затухания пучка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Е.Левичев, П.Пиминов. Влияние краевого поля квадрупольной линзы на нелинейный сдвиг бетатронной частоты. Препринт ИЯФ-2000-14, Новосибирск, 2000.
2. Е.Левичев, П.Пиминов. Симплектический интегратор для моделирования движения частицы в сложных магнитных полях. Прикладная физика, 2002, N 3, стр.136.
3. E.Levichev, P.Piminov. Symplectic integrator for particle tracking in complex magnetic field. EPAC-2002-WEPRI054, p.1655-1657. EPAC'02, Paris, France, 3-7 Jun 2002.
4. В.Квардаков, Е.Левичев, А.Науменков, П.Пиминов. Экспериментальное изучение секступольных резонансов связи на ВЭПП-4М. Материалы XVIII совещания по ускорителям заряженных частиц, 1-4, Октябрь 2002, Обнинск, Россия.
5. V.Kiselev, E.Levichev, P.Piminov. Effect of dipole wigglers on dynamic aperture of VEPP-4M collider. APAC-2004-MOP15012, APAC'04, Gyeongju, Korea, 22-26, March, 2004.
6. V.Kiselev, V.Kvardakov, E.Levichev, A.Naumenkov, P.Piminov. Nonlinear beam dynamics experiments at the VEPP-4M storage ring. APAC-2004-MOP15006, APAC'04, Gyeongju, Korea, 22-26, March, 2004.

7. V.Kvardakov, E.Levichev, A.Naumenkov, P.Piminov. The Study of 2D Sextupole Coupling Resonances at VEPP-4M. EPAC-2004, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004. EPAC-2004-WEPLT003, p.1819-1821.
8. A.Gallo et al. Proposal of a Strong RF Focusing Experiment at DAFNE. EPAC-2004-MOPLT057, EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004.
9. E.Levichev, P.Piminov. Dynamic aperture calculation for the DAPHNE-II project. Workshop on e+e- in the 1-GeV to 2-GeV Range: Physics and Accelerator Prospects - ICFA Mini-workshop - Working Group on High Luminosity e+e- Colliders, Alghero, Sardinia, Italy, 10-13 Sep 2003.
10. C.Biscari et al. Proposal of an Experiment on Bunch Length Modulation in DAFNE. PAC-05, Knoxville, Tennessee, 16-20 May 2005. PAC-2005-ROAA003, pp. 336-338.
11. D.Alesini et al. Proposal of a Bunch Length Modulation Experiment in DAFNE. SLAC-PUB-11077, LNF-05-04-IR, Feb 2005. 24pp.
12. V.Blinov et al. Status of VEPP-4M collider: current activity and plans. Proceedings of XIX International Workshop on Charged Particle Accelerators, September 13-18, 2005, Alushta, Crimea. Вопросы Атомной Науки и Техники, Украина.
13. D.Alesini et al. DAFNE Upgrade for Siddharta Run. LNF-INFN Preprint LNF-06/33(IR), 2006.
14. E.Levichev, P.Piminov, P.Raimondi, M.Zobov. Dynamic Aperture Optimization for The DAFNE Upgrade. LNF-INFN Preprint LNF-07/15 (IR), 2007.
15. H.Braun et al. Minimizing emittance for the CLIC damping ring. EPAC06-MOPLS134, EPAC'06, Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006.
16. E.Levichev, P.Piminov. Algorithms for Chromatic Sextupole Optimization and Dynamic Aperture Increase. EPAC06-WEPC085, EPAC'06, Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006.
17. SuperB collaboration. SuperB: A High-Luminosity Asymmetric e+e- Super Flavour Factory. Conceptual Design Report. LNF INFN Report INFN/AE-07/2, 2007.
18. S.Glukhov, E.Levichev, P.Piminov, D.Shatilov. Dynamic aperture studies in e+e- factories with crab waist. In the Proceedings of CARE-HHH-APD Workshop on Interaction Regions for the LHC Upgrade, DAFNE and SuperB (IR'07), Frascati, Italy, 7-9 Nov 2007, p.114-116.

19. M.Biagini et al. DAFNE Phi-factory upgrade for SIDDHARTA run. PAC07-MOQBKI02. PAC'07, Albuquerque, New Mexico, 25-29 Jun 2007.
20. V.Kiselev, E.Levichev, O.Meshkov, P.Piminov. Study of Beam Dynamic during the Crossing of Resonances in the VEPP-4M Storage Ring. TUOBG02, EPAC'08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
21. D.Einfeld, E.Levichev, P.Piminov. Influence of Insertion Devices on the ALBA Dynamic Aperture. EPAC08-WEPC117, EPAC'08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
22. D.Einfeld, E.Levichev, P.Piminov. ALBA Dynamic Aperture Optimization. EPAC08-THPC067, EPAC'08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
23. D.Einfeld, E.Levichev, P.Piminov. Effect of Magnetic Multipoles on the ALBA Dynamic Aperture. EPAC08-THPC068, EPAC'08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
24. V.Kiselev et al. The VEPP-4M Dynamic Aperture Determination with Beam-beam Effects. EPAC08-THPC080, EPAC'08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
25. A.Bogomyagkov, E.Levichev, I.Okunev, P.Piminov, S.Sinyatkin, P.Vobly. Final focus quadrupole for the crab-waist Tau-Charm factory. EPAC08-WEPP046, EPAC'08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
26. O.Meshkov et al. New optical diagnostics of the VEPP-4M collider. Phys.Part.Nucl.Lett.5:601-604,2008.
27. D.Shatilov, P.Piminov, M.Zobov. Beam-Beam Simulations for Super B-factory with Asymmetrical LER and HER Lattice Parameters. SB-NOTE-ACC-2008-002, 2008.
28. D.Shatilov, P.Piminov, M.Zobov. Beam-Beam Simulations for SuperB-factory with Asymmetrical LER and HER Lattice Parameters. SuperB Note SB-NOTE-ACC-2008-002, 2008.
29. C.Milardi et al. Present status of the DAFNE upgrade and perspectives. Int.J.Mod.Phys.A24:360-368, 2009.
30. DAFNE collaboration. Beam Dynamics in Crab Waist Collisions at DAΦNE. ICFA BD Newsletter, 48:34-44, 2009.

31. S.Glukhov et al. Study of Beam Dynamics during the Crossing of Resonance in the VEPP-4M Storage Ring. ICFA BD Newsletter, 48:171-181, 2009.
32. DAFNE collaboration. Crab waist collision at DAΦNE. ICFA BD Newsletter, 48:23-33, 2009.
33. A.Blinov et al. The Project of Tau-charm Factory with Crab Waist in Novosibirsk. ICFA BD Newsletter, 48:268-279, 2009.
34. P.Piminov et al. Study of Beam Dynamics During the Crossing of Resonances in the VEPP-4M Storage Ring. PAC-09, Vancouver, Canada, 4-8 May, 2009.
35. E.Levichev, P.Piminov, D.Shatilov. Study of the Nonlinear Beam Dynamics in Storage Ring with Strong Damping and Space Charge. PAC-09, Vancouver, Canada, 4-8 May, 2009.
36. M.Biagini et al. SuperB Factory Dynamic Aperture Study and Optimization. PAC-09, Vancouver, Canada, 4-8 May, 2009.
37. P.Piminov et al. Crab Waist Collision Scheme: Numerical Simulations versus Experimental Results. PAC-09, Vancouver, Canada, 4-8 May, 2009.
38. О.В.Анчугов и команда ВЭПП-4М. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. ЖЭТФ, 2009, том 136, №4, стр.690-702.
39. O.Anchugov et al. Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron-Positron Collider. Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 109, No. 4 (2009), p.590-601.
40. O.V.Anchugov et al. Use of the Methods of Accelerator Physics in Precision Measurements of Particle Masses on the VEPP-4 Complex with the KEDR Detector. Nuclear Experimental Technique, vol.53, No.1, pp.15-28, 2010.
41. О.В.Анчугов и команда ВЭПП-4М. Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4 с детектором КЕДР. Техника ядерного эксперимента, №1, стр.20-33, 2010.
42. M. Zobov et al. Test of crab-waist collisions at DAFNE Phi factory. Phys. Rev. Lett. 104:174801, 2010.

ПИМИНОВ Павел Алексеевич

**Численное моделирование
и оптимизация параметров
нелинейного движения частиц
в циклическом ускорителе**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 18.11.2010 г.

Подписано в печать 18.11.2010 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 36

Обработано на IBM PC и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.