

На правах рукописи

БЕРКАЕВ Дмитрий Евгеньевич

**ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ
В КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000**

**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:

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

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

СИДОРИН — кандидат физико-математических наук,
Анатолий Олегович Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна.

ВЕДУЩАЯ — ГНЦ “Институт теоретической
ОРГАНИЗАЦИЯ: и экспериментальной физики”, г. Москва.

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 работы

Начиная с 1974 г. электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М в Новосибирске успешно работал в диапазоне энергий от порога рождения адронов до 1.4 ГэВ в с.ц.м. С помощью двух детекторов СНД и КМД-2 был набран интеграл светимости порядка 74 пбн^{-1} . Это позволило детально изучить большинство каналов адронной e^+e^- аннигиляции.

Весной 2000 года в ИЯФ СО РАН принято решение о модернизации ускорительного комплекса ВЭПП-2М для повышения светимости и увеличения максимальной достижимой энергии до 2 ГэВ, что позволит существенно расширить потенциал доступных экспериментов на комплексе. Кроме того, этот коллайдер позволит проверить концепцию круглых сталкивающихся пучков. Новый проект получил название ВЭПП-2000.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является создание каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов в новый коллайдер ВЭПП-2000. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: расчёт основных параметров однооборотной инжекции в электронно-оптическую структуру нового коллайдера ВЭПП-2000; расчёт геометрии, оптической схемы, а также расчёт магнитных параметров элементов каналов инжекции из бустерного накопителя БЭП в новый коллайдер ВЭПП-2000; создание системы измерения параметров пучков в каналах и создание системы автоматизации управления этими каналами, интегрированной в общую систему автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им непосредственно рассчитан процесс инжекции в ВЭПП-2000, предложена геометрия и рассчитана оптика каналов транспортировки и инжекции, под его непосредственным

руководством создана система измерения параметров пучков, кроме этого он является автором системы автоматизации каналов инжекции.

Научная новизна

В связи с значительной модернизацией комплекса возникла необходимость проектирования новых каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов из бустерного накопителя БЭП в кольцо коллайдера ВЭПП-2000. Несмотря на то, что это кольцо имеет геометрию, похожую на ВЭПП-2М, модифицировать старые каналы не представлялось возможным, так как они рассчитаны на максимальную энергию 600 МэВ, и транспортируют пучки в те места, где у новой машины располагаются триплеты квадрупольных линз.

Новые каналы рассчитаны на энергию вплоть до 900 МэВ и транспортируют $10^8 - 10^{11}$ частиц в пучке, а также обеспечивают согласование оптических функций колец БЭП и ВЭПП-2000.

Поскольку новый коллайдер располагается в том же экспериментальном холле, что и ВЭПП-2М, то, в связи с недостатком места, для достижения проектных энергий требуются большие магнитные поля поворотных магнитов и фокусирующей системы как в самом коллайдере ВЭПП-2000, так и в каналах транспортировки и инжекции. Следствием этого стала необходимость применения высокополевых (до 30 кГс) выпускных и впускных магнитов с железным ярмом, импульсных квадрупольных линз, обеспечивающих высокие поля при малых габаритах, а также общая сложность пространственной геометрии каналов инжекции в ВЭПП-2000.

Применение в каналах инжекции поворотных магнитов, питаемых последовательно с магнитами основного поля БЭП позволило избежать необходимости создания дополнительных сильноточных источников питания. Основные поворотные магниты канала имеют ту же кривую магнитного насыщения, что и магниты БЭП.

Автоматизированное управление каналами инжекции в коллайдер создавалось как неотъемлемая часть системы автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000. В основе построения данной системы лежит клиент-серверная архитектура взаимодействия программ и приложений между собой. В качестве основного протокола передачи данных

между серверами и клиентами выбран протокол TCP/IP, имеющий повсеместное распространение. Для управления аппаратным обеспечением используется современный стандарт промышленной связи CAN-bus, отличающийся надежностью и простотой реализации.

Автоматизированное измерение параметров пучков в каналах инъекции использует те же принципы построения, что и общая система автоматизации, благодаря чему в руках оператора появляется удобный инструмент для настройки прохождения по каналам пучков электронов и позитронов их инъекции в коллайдер ВЭПП-2000.

Научная и практическая ценность

Разработка и создание каналов транспортировки и инъекции электронов и позитронов в новое кольцо коллайдера ВЭПП-2000 с максимальной эффективностью позволили достичь проектных параметров светимости на энергии φ -мезона и приступить к выполнению физической программы коллайдера ВЭПП-2000.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Рассчитан аксептанс структуры кольца коллайдера ВЭПП-2000 в различных режимах работы.
2. Разработан физический проект каналов инъекции электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000, рассчитаны геометрия и система фокусировки этих каналов.
3. Произведены магнитные расчеты всех элементов каналов инъекции, проведенные магнитные измерения показали хорошее соответствие параметров расчетным значениям.
4. Создана автоматизированная система наблюдения за пучками в каналах инъекции.
5. Создана современная система управления каналами, интегрированная в систему автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Апробация работы

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

10th European Particle Accelerator Conference (EPAC 06, Edinburgh, Scotland), 20th Russian Conference of on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2006, Новосибирск, Россия), 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC 08, Magazzini del Cotone, Genoa, Italy), 40th ICFA ABDW 2008 (Novosibirsk, Russia), 21th Russian Conference of on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2008, Звенигород, Россия), 12th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS'2009, Kobe, Japan), 13th ISTC SAC Seminar "New Perspectives of High Energy Physics" (2010, Новосибирск, Россия)

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения. Материал работы изложен на 76 страницах, включает 54 рисунка и список литературы, содержащий 29 наименований.

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 представлен проект ускорительного комплекса ВЭПП-2000, схема которого представлена на рисунке 1, и описаны основные его подсистемы. Проведен анализ инжекции пучка в фазовый объём коллайдера с учетом нелинейных полей инфлектора и других параметров (см. рисунок 2).

Оптические функции в начале (1) и конце (2) каналов транспортировки:

$$\begin{aligned} \beta_x &= 224.5 \text{ см}, & \alpha_x &= 1.1, & \beta_z &= 78.9 \text{ см}, & \alpha_z &= 0.1, \\ \psi_x &= 41.5 \text{ см}, & \psi'_x &= -0.275, & \psi_z &= 0 \text{ см}, & \psi'_z &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta_x &= 204 \text{ см}, & \alpha_x &= -0.23, & \beta_z &= 204 \text{ см}, & \alpha_z &= -0.23, \\ \psi_x &= 41.5 \text{ см}, & \psi'_x &= -0.275, & \psi_z &= 0 \text{ см}, & \psi'_z &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

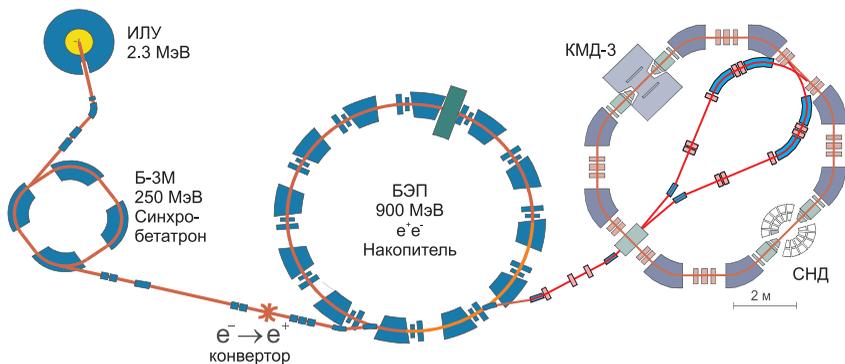


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

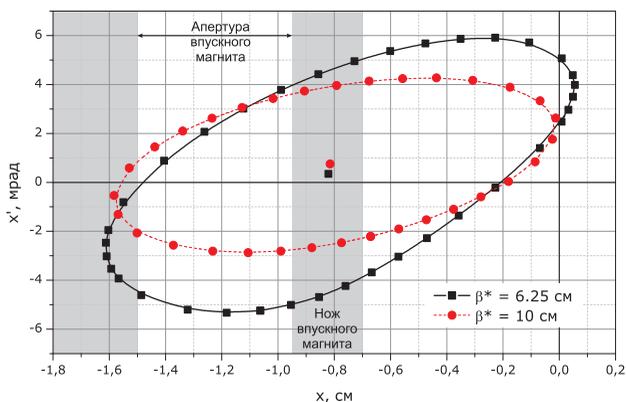


Рис. 2. Сравнение акцептансов ВЭПП-2000 для структур с различными β^* .

Для инжектирования в кольцо ВЭПП-2000 пучок должен пройти из бустерного накопителя БЭП на энергии 900 МэВ, с эмиттансами $\varepsilon_x = 6.48 \cdot 10^{-6}$ см·рад, $\varepsilon_z = 1.6 \cdot 10^{-8}$ см·рад, энергетическим разбросом $\sigma_{dE/E} = 5.6 \cdot 10^{-6}$ во впускной промежуток ВЭПП-2000, имея координаты на впуске $x = -1.1$ см, $x' = 0$. При этом впускаемый пучок должен подняться на 760 мм — расстояние между плоскостями орбит БЭП и ВЭПП-2000.

Во второй главе описаны каналы транспортировки электронов и позитронов из накопителя БЭП в коллайдер ВЭПП-2000. Общий вид каналов с обозначениями основных элементов представлен на рисунке 3.

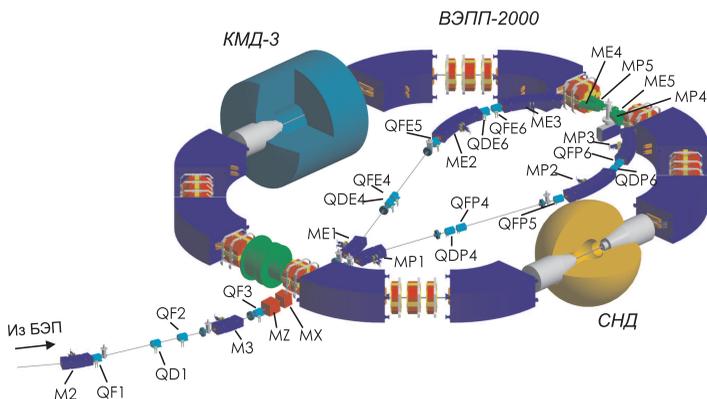


Рис. 3. Канал перепуска БЭП — ВЭПП-2000

Схема фокусировки представлена на рисунке 4.

Существенной особенностью каналов является трехмерная пространственная геометрия, поскольку плоскость орбиты кольца БЭП расположена на 760 мм ниже плоскости ВЭПП-2000, а длина каждого из каналов от выпуска до точки инжекции составляет 14,8 м.

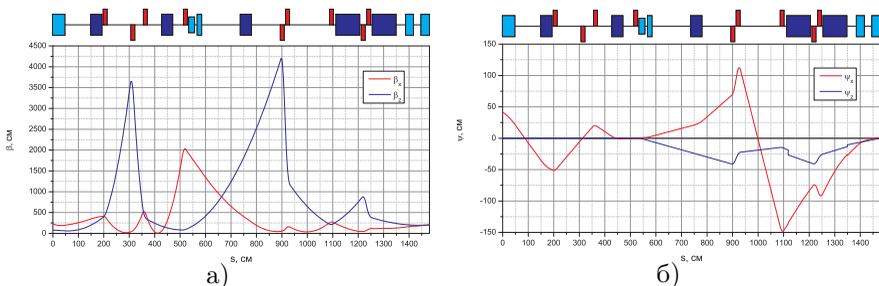


Рис. 4. Оптические функции канала БЭП–ВЭПП-2000. а) β -функции, б) дисперсии.

Вторая глава, также, содержит расчеты основных параметров и конструктивные особенности всех магнитных элементов используемых в канале: дипольных магнитов, квадрупольных линз и корректоров. Проведенные магнитные измерения элементов данных каналов показали хорошее соответствие измеренных характеристик проектным параметрам.

Впускной промежуток коллайдера представлен на рисунке 5. Как видно из рисунка, впускной участок разделен на *впускной* и *доворачивающий* магниты с пересечением электронной и позитронной траекторий между ними. Такое решение позволяет уменьшить поле впускных магнитов до 20 кГс (для сравнения: 30 кГс в проекте ВЭПП-2М), что значительно снижает требования на механическую прочность его ножа. Доворачивающий магнит с полем 30 кГс не имеет ножа, поэтому нет и жёстких требований на прочность конструкции этого магнита.

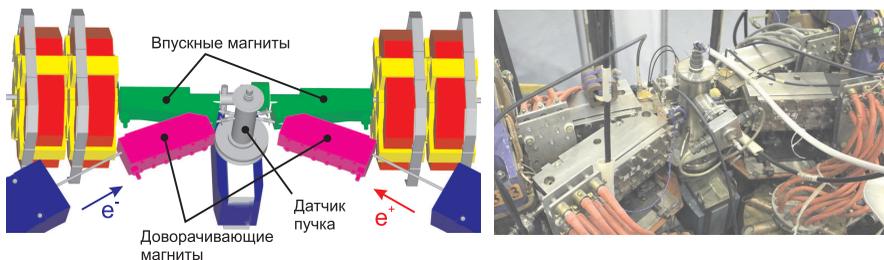


Рис. 5. Впускной промежуток коллайдера ВЭПП-2000.

В третьей главе описана система измерения параметров пучка в каналах БЭП-ВЭПП-2000. Для диагностики пучков частиц применяются два взаимно дополняющих друг друга типа датчиков: измерители профиля пучков, основанные на эффекте вторичной эмиссии и датчики токов изображения. Вся система измерения параметров пучков в каналах выполнена помехозащищённой от мощных коротких импульсов дефлектора БЭП и инфлекторов ВЭПП-2000.

На рисунке 6 приведен пример прохождения электронного пучка по каналу.

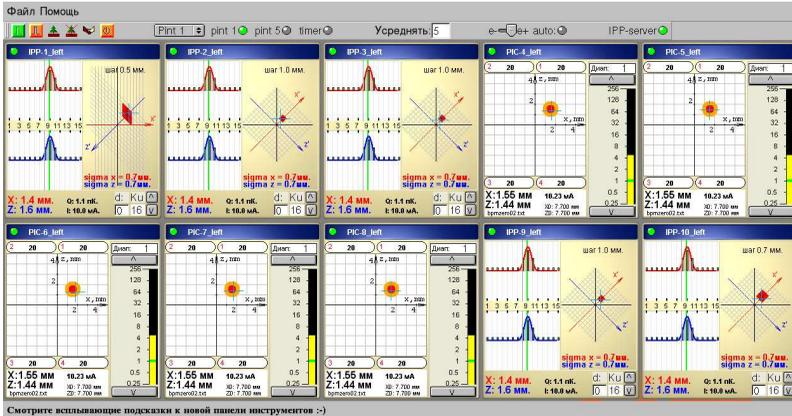


Рис. 6. Программа «ИПП» на комплексе ВЭПП-2000.

Разработанный на основе современных программно-аппаратных решений и протоколов гибкий инструментарий является частью общей системы автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000 и позволяет с хорошей эффективностью настраивать прохождение пучков по каналам и их захват в коллайдер ВЭПП-2000.

Четвертая глава посвящена вопросам автоматизации каналов транспортировки и инъекции БЭП–ВЭПП-2000. В ней описаны схемы управления питанием всех элементов каналов, а также программно-аппаратные решения, заложенные в основу построения системы автоматизации каналов инъекции и всего комплекса ВЭПП-2000 в целом. В качестве стандартов связи системы управления с аппаратным обеспечением используются современные и хорошо зарекомендовавшие себя протоколы CAN-Bus и SAMAC, а для коммуникации программного обеспечения друг с другом — широко распространенный протокол TCP/IP.

Во второй части главы представлена схема временной синхронизации работы системы управления каналами и описан программный комплекс системы автоматизации, схема которого представлена на рисунке 7. В качестве примеров клиентских приложений на данной схеме приведены программы управления каналами (а), управления инфлекторами (б) и контроля импульсных источников питания (в).

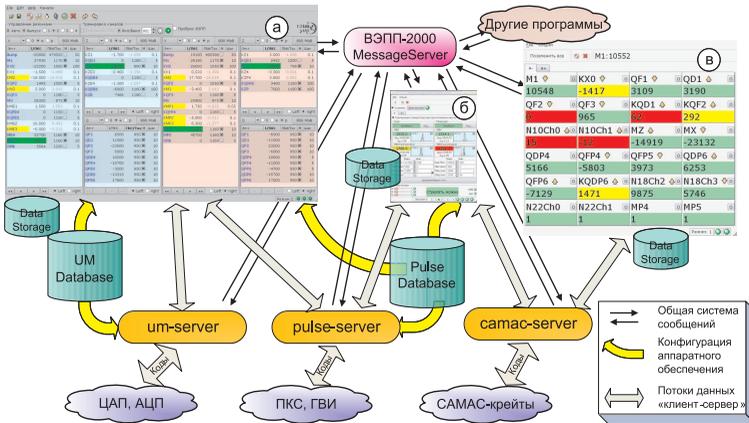


Рис. 7. Схема работы программного обеспечения управления каналами.

В **Заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертации.

В **Приложении А** описан алгоритм расчета параметров пучков на основе данных измерителей положения пучка, применяемый в системе наблюдения.

Основные результаты работы

В данной работе представлены разработка проекта и создание каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов из бустерного накопителя БЭП в новый коллайдер ВЭПП-2000. Канал способен перепускать пучки $10^8 - 10^{11}$ частиц с энергией до 900 МэВ.

В результате моделирования однооборотной инжекции в структуру ВЭПП-2000 рассчитан физический аксептанс структуры коллайдера. Определены оптимальные параметры впуска: оптические функции, координата и угол влета частиц, силы удара и предудара.

Рассчитана сложная трехмерная геометрия каналов транспортировки пучков частиц включающая в себя наклонные участки и повороты системы координат. Оптическая схема позволяет достигнуть требуемого согласования оптических функций двух колец.

Сделаны расчеты конструкций всех элементов каналов, эти элементы спроектированы и изготовлены. Проведенные импульсные магнитные измерения показали хорошее соответствие полученных параметров расчетным значениям.

Разработана и создана система диагностики пучков. Создано программное обеспечение для этой системы.

Система автоматизации и управления, разработанная в рамках данной работы, является одним из ключевых моментов проекта каналов инжекции и всего ускорительного комплекса в целом.

В настоящее время, созданный проект каналов транспортировки позволяет инжектировать пучки электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000 с близкой к 100% эффективностью.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Berkaev D. E. et al.* Beams injection system for e+ e- collider VEPP-2000. — European Particle Accelerator Conference (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006.
2. *Berkaev D. E., Shatunov Yu.M. et al.* Status of VEPP-2000 project. — Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 06), Novosibirsk, Russia, 2006.
3. *Berkaev D. E. et al.* Beams injection system for e+ e- collider VEPP-2000. — Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 06), Novosibirsk, Russia, 2006.
4. *Berkaev D. E. et al.* Control System of VEPP-2000 Collider (Software, Hardware). — Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 06), Novosibirsk, Russia, 2006.
5. *О. В. Беликов, Д. Е. Беркаев, В. Р. Козак, А. С. Медведко.* Усилители мощности УМ-6 и УМ-20 для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000: Препринт 2007-14 — Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2007. <http://www.inp.nsk.su/publications>.
6. *Berkaev D. E., Shatunov Y. M. 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.

7. *Berkaev D. E. et al.* Status and progress VEPP-2000. — 21st Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 08), Zvenigirod, Russia, 2008. *Zvenigorod 2008, Particle accelerator* 70-73.
8. *Berkaev D. E. et al.* Control System for Injection Channels of VEPP-2000 Collider. — 21st Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 08), Zvenigirod, Russia, 2008. *Zvenigorod 2008, Particle accelerator*.
9. *Berkaev D. E. et al.* Beam Measurement System of VEPP-2000 Injection Channels. — 21st Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 08), Zvenigirod, Russia, 2008. *Zvenigorod 2008, Particle accelerator*.
10. *Berkaev D. et al.* First commissioning results of VEPP-2000. — ICFA Beam Dyn. Newslett. — 2009. — Vol. 48. — P. 235–242.
11. *Berkaev D. E., Achasov M.N. et al.* First experience with SND calorimeter at VEPP-2000 collider. — Nucl. Instrum. Meth. A598:31-32, 2009.
12. *Berkaev D. E. et al.* Beam measurement system of VEPP-2000 injection channels. — ICALEPCS'09, Kobe, Japan, 10-17 Oct 2009.
13. *Berkaev D. et al.* VEPP-2000 collider control system. — ICALEPCS'09, Kobe, Japan, 10-17 Oct, 2009.
14. *Berkaev D. et al.* Control system for injection channels of VEPP-2000 collider. — ICALEPCS'09, Kobe, Japan, 10-17 Oct, 2009.
15. *Berkaev D. E., Schwartz D. B. et al.* Present Status of VEPP-2000. — 22 Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 10), Reotvino, Russia, 2010.
16. *Berkaev D. E., Shatunov P. et al.* The automation system of the electron-positron collider VEPP-2000. — 13th ISTC SAC Seminar “New Perspectives of High Energy Physics”, Novosibirsk, Russia, 1-5 Sep, 2010.
17. *Berkaev D. et al.* Control system for injection channels of VEPP-2000 collider. — 13th ISTC SAC Seminar “New Perspectives of High Energy Physics”, Novosibirsk, Russia, 1-5 Sep, 2010.
18. *Беркаев Д. Е., Шатунов Ю. М. и др.* — Проект коллайдера ВЭПП-2000 [Электронный ресурс]. — ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2010. <http://vega.inp.nsk.su/vepp2000/>.

БЕРКАЕВ Дмитрий Евгеньевич

**Инжекция электронов и позитронов
в коллайдер ВЭПП-2000**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 17.11.2010 г.

Подписано в печать 17.11.2010 г.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 33

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.