

На правах рукописи

ШАТИЛОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВСТРЕЧИ
В ЦИКЛИЧЕСКИХ КОЛЛАЙДЕРАХ

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2013

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛЕВИЧЕВ
Евгений Борисович – доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

МЕШКОВ
Игорь Николаевич – доктор физико-математических наук,
профессор, член-корр. РАН,
Объединённый институт ядерных
исследований, Дубна, советник дирекции.

КООП
Иван Александрович – доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск,
главный научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Национальный исследовательский центр
“Курчатовский институт”, Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2013 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального госу-
дарственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики
имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Основным источником экспериментальных данных для физики высоких энергий являются коллайдеры – установки со встречными пучками заряженных частиц. В настоящее время в мире работает несколько коллайдеров: ВЭПП-2000, ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), DAΦNE (INFN-LNF, Италия), BEPC-II (ИНЕР, Китай), LHC (CERN, Швейцария), RHIC (BNL, США). Строится В-фабрика нового поколения SuperKEKB (КЕК, Япония). Проектируются коллайдеры NICA (ОИЯИ, Дубна) и “Супер С-Тау фабрика” (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). Рассматриваются различные варианты строительства “Хиггс-фабрики”.

Наиболее важными параметрами коллайдеров являются энергия частиц в пучке и светимость, которая определяет их производительность – количество полезных событий в единицу времени. Одним из основных факторов, ограничивающих светимость, являются т.н. *эффекты встречи* – взаимодействие частиц пучка с электромагнитным полем встречного сгустка, которое представляет собой своеобразную нелинейную линзу. Изучение и моделирование этих эффектов помогает оптимизировать параметры (повысить светимость) работающих коллайдеров, и необходимо для проектирования новых установок. В этой связи, развитие и совершенствование методов численного моделирования эффектов встречи является весьма актуальной задачей.

Проекты новых коллайдеров, и модернизация уже существующих, как правило, основаны на применении новых схем столкновения пучков. Выбор оптимального варианта зависит от многих условий, и здесь необходимо хорошо представлять принцип работы каждой схемы, её положительные и отрицательные стороны, условия применимости. Численное моделирование помогает в этом разобраться, примером чему может служить сравнительный анализ различных конфигураций места встречи, проведённый в данной работе.

Цель диссертационной работы

Развитие методов численного моделирования эффектов встречи в циклических коллайдерах, и создание на их основе эффективной программы для расчётов.

Изучение нелинейных резонансов, возникающих из-за эффектов встречи, в различных схемах столкновения пучков.

Личный вклад автора

Автором были развиты методы моделирования эффектов встречи и на их основе написана программа Lifetrac, которая успешно используется в нескольких ускорительных центрах. Автор принимал активное участие в изучении схемы столкновения пучков “Crab Waist”, и выполнял моделирование для оптимизации этой схемы на коллайдере DAΦNE.

Научная новизна

Предложен оптимальный метод продольного разбиения встречного пучка на “слайсы”, и алгоритм трекинга при встрече под углом.

Разработан оригинальный метод расчёта взаимодействия с пучками, имеющими произвольное распределение плотности. Метод обеспечивает высокую точность и скорость вычислений при относительно небольшом объёме требуемой памяти.

Разработан оригинальный метод построения равновесной функции распределения частиц в пучке, включая большие амплитуды. Метод даёт огромную (несколько порядков) экономию процессорного времени.

Дано наглядное объяснение механизма подавления резонансов связи в схеме столкновения пучков Crab Waist.

Научная и практическая ценность

Описанные в диссертации методы существенно повысили точность и эффективность численного моделирования эффектов встречи. Заложены основы для дальнейшего развития программы: переход на квази-сильно-сильную модель.

Разработанная автором программа Lifetrac используется для оптимизации коллайдеров ВЭПП-4М, ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), DAΦNE (INFN-LNF, Италия), LHC (CERN, Швейцария), а также для проектирования новых установок: “Супер С-Тау фабрика” (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), IOTA (FNAL, США). Планируется её использование для проектов SuperKEKB (КЕК, Япония) и NICA (ОИЯИ, Дубна).

Основные положения, выносимые на защиту

Общее развитие метода численного моделирования эффектов встречи в циклических коллайдерах.

Метод расчёта взаимодействия с пучками, имеющими произвольное распределение плотности.

Метод построения равновесной функции распределения частиц в пучке, включая большие амплитуды.

Сравнительный анализ различных схем столкновения пучков, в том числе схемы Crab Waist и механизма подавления в ней резонансов связи.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск), на международных научных конференциях: Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop (Дубна, 1995), Particle Accelerator Conference (Dallas, USA, 1995), Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop (Frascati, Italy, 1997), Particle Accelerator Conference (New York, USA, 1999), Particle Accelerator Conference (Chicago, USA, 2001), Particle Accelerator Conference (Knoxville, USA, 2005), Российская конференция по ускорителям заряженных частиц (Новосибирск, 2006), European Particle Accelerator Conference (Genoa, Italy, 2008), Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop (Новосибирск, 2008), International Particle Accelerator Conference (Kyoto, Japan, 2010), International Particle Accelerator Conference (New Orleans, USA, 2012). Кроме этого, результаты диссертационной работы содержатся в шести статьях, опубликованных в реферируемых научных журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 55 наименований, изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении перечислены основные эффекты (когерентные и некогерентные), влияющие на динамику пучков в ускорительно-накопительных кольцах. Показаны роль и место эффектов встречи в этом ряду. Рассмотрены различные подходы к моделированию эффектов встречи. Наиболее полной является *сильно-сильная* модель, которая позволяет изучать как некогерентные, так и когерентные эффекты. Но она и наиболее сложна для реализации, требует огромных вычислительных ресурсов. *Сильно-слабая* модель подходит только для некогерентных эффектов. Расчёты по ней значительно проще и быстрее, но при этом не учитывается искажение функции распределения встречного сгустка. Если целью моделирования является поиск хороших условий, в которых возмущения невелики, то *сильно-слабая* модель будет предпочтительней.

Для изучения некогерентных эффектов встречи лучше всего подошла бы *квази-сильно-сильная* модель. В этом подходе делается несколько итераций сильно-слабого моделирования, при которых сильный и слабый пучки меняются местами. В результате можно получить самосогласованное распределение в обоих встречных пучках – такое же, как в *сильно-сильной* модели. Этот метод является естественным развитием *сильно-слабого*, но требует новой функциональности: расчёта эффектов встречи для пучков с произвольным

распределением плотности. Такая опция в программе недавно появилась, и переход на эту модель планируется в ближайшем будущем.

В первой главе рассматривается транспортное преобразование через участки кольца и место встречи (IP – Interaction Point) для одной частицы. Трекинг на участках между IP может делаться различными способами. Самый простой – это линейное преобразование, плюс затухание и независимый шум без корреляций для всех компонент координат. Самый правильный, и поэтому наиболее трудоёмкий и медленный – трекинг через реальную магнитную структуру с учётом всех нелинейностей, хроматизма, корреляций шумов, и т.п. Здесь оптимальным решением будет объединение двух специализированных программ. Возможен и промежуточный вариант, когда в простой модели учитываются хроматизм и кубическая нелинейность бетатронных частот, хроматизм бета-функций в IP, корреляции шумов. Обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода.

При трекинге частиц через IP надо учитывать, что в ультрарелятивистском пределе электромагнитное поле, создаваемое заряженными частицами встречного пучка, сжимается в продольном направлении в плоскость, перпендикулярную вектору скорости. Поэтому представление встречного сгустка в виде набора тонких “блинов” (*слайсов*) будет вполне оправданным. Это позволяет использовать относительно простые формулы для преобразования и обеспечивает его симплектичность, как любое приближение тонких линз. В общем случае, параметры встречного пучка с нормальным распределением задаются матрицей моментов второго порядка в IP. Отсюда можно получить все необходимые данные для вычисления трёхмерного толчка, который испытывает частица при столкновении со слайсом на произвольном азимуте.

Параметры разбиения встречного сгустка (продольные координаты и “веса” слайсов) зависят от соотношения длины сгустка и бета-функций в IP, а также от алгоритма разбиения. Для того чтобы оценить погрешность, возникающую при замене непрерывного продольного распределения на последовательность слайсов, был предложен простой метод сравнения с асимптотическим пределом. Он позволил определить эффективность разных алгоритмов, и для каждого из них найти необходимое (при заданной точности) число слайсов. Наличие этого инструмента помогло разработать новые, более эффективные алгоритмы продольного разбиения, которые обеспечивают нужную точность при меньшем количестве слайсов, и соответственно уменьшают затраты процессорного времени.

Если пучки встречаются под углом, то транспортное преобразование в IP усложняется. Наиболее распространённый подход, предложенный К. Hirata, связан с переходом в движущуюся систему координат, где пучки снова встречаются “лоб в лоб”. Там производятся все вычисления, и затем выполняется обратное преобразование Лоренца для перехода в лабораторную систему. Автором был предложен другой подход, в котором все вычисления выполняются в неподвижной системе координат, связанной со встречным пуч-

ком. Переход в эту систему осуществляется посредством обычного поворота в трёхмерном пространстве, поэтому преобразования координат выполняются проще и быстрее.

Если в коллайдере сталкиваются поляризованные пучки, то сохранение высокой степени поляризации в течение времени жизни светимости будет одной из приоритетных задач. Эффекты встречи могут внести заметный вклад в процессы деполяризации, поэтому их надо учитывать в программах, которые делают спиновый трекинг. Задача сводится к поиску матрицы вращения спина при пролете через встречный пучок, а точнее – через один слайс. Из уравнения движения спина в электромагнитном поле (БМТ) выводятся формулы, которые выражают компоненты вектора поворота спина через компоненты изменений импульса Δp .

Во второй главе рассматривается взаимодействие частицы с пучками, имеющими произвольное распределение плотности. Актуальность этой темы значительно выросла после того как появилась схема “Crab Waist”, в которой распределение существенно отличается от нормального даже для невозмущённого (т.е. без эффектов встречи) пучка. В первом параграфе выводится формула для функции распределения “крабового” пучка – она представлена в виде интеграла, который не берётся аналитически. Поэтому расчёт толчков Δp приходится выполнять с использованием специальных сеток. Делается оценка необходимого размера сетки и количества узлов, которое потребуется для вычислений с нужной точностью. Показано, что трёхмерная прямоугольная равномерная сетка с нужными параметрами должна иметь слишком большое число узлов, особенно при встрече под углом с большим параметром (углом) Пивинского, куда относится и схема Crab Waist.

Оптимальная сетка должна быть непрямоугольной (повторять форму hour-glass) и неравномерной. Максимальная плотность узлов требуется в непосредственной близости от IP, где большие градиенты. По мере удаления от IP расстояние между узлами можно увеличивать без потери точности. В целом, по сравнению с прямоугольной равномерной сеткой, число узлов уменьшается примерно в 200 раз. Предложен метод построения такой сетки, где в узлах сразу вычисляется трёхмерный толчок Δp с помощью прямого интегрирования, без решения дифференциальных уравнений. Между узлами делается трёхмерная интерполяция третьего порядка, которая даёт относительную точность $\sim 10^{-6}$.

Для оценки точности метода создаётся сетка для пучка с нормальным распределением, и сравнивается с известными аналитическими формулами. Показано, что основная погрешность связана с интегрированием и составляет не более 10^{-3} . Ошибка не носит случайный шумовой характер, и эквивалентна незначительной модификации функции распределения – много меньше, чем происходит в реальном пучке, и которой мы пренебрегаем в сильно-слабой модели. Важной характеристикой сетки является её гладкость, т.е.

отсутствие особенностей в узлах и на границах. Это обеспечивается высоким порядком интерполяции, формой и размером сетки.

Сгенерирована сетка для “крабового” пучка. Наглядно показаны искажение функции распределения, разворот перетяжки (линия минимума вертикальной бета-функции), характерные изменения в Δp . На границе сетки относительные различия Δp для крабового и нормального распределений не превысили 10^{-3} . Такие сетки применялись в моделировании эффектов встречи для коллайдера DAΦNE (INFN-LNF, Италия), на котором впервые была реализована схема Crab Waist, и было получено очень хорошее согласие с экспериментальными данными. В дальнейшем использование сеток для сгустков с негауссовым распределением плотности позволит решать самосогласованную задачу для двух сильных пучков, т.е. перейти к квази-сильно-сильной модели.

В третьей главе описан разработанный автором метод построения равновесного распределения частиц в пучке, включая большие бетатронные амплитуды. Так как доля частиц в “хвостах” распределения невелика, для получения в моделировании статистически достоверного результата потребуются очень большие затраты процессорного времени; при этом статистика на малых амплитудах будет во много раз больше необходимой. Задача состоит в такой модификации алгоритма, которая позволит перераспределить процессорное время в пользу частиц на больших амплитудах, не нарушая при этом общей картины.

Распределение строится в плоскости нормализованных бетатронных амплитуд следующим образом. На первом шаге проводится линия, которая делит плоскость на две односвязные области, и в процессе трекинга фиксируются все случаи перехода частицы из внутренней области (I) во внешнюю (II). Координаты в момент перехода запоминаются – эта информация позволит потом статистически верно воспроизвести потоки частиц во внешнюю область. После этого внутренняя область становится “чёрным ящиком” и проводится следующая граница, которая делит старую внешнюю область на две части: внутреннюю (II) и внешнюю (III).

На втором шаге в процессе трекинга на каждом обороте устанавливается, в какой из трех областей находится частица. Если она попадает в первую область, то делается *restart*: частица принудительно сажается в одну из точек вылета, запомненных на первом шаге, и продолжает движение. Поскольку процесс является марковским, такая процедура не нарушает общий характер движения. Если частица совершает переход из второй области в третью, то запоминаются её координаты в этот момент – так накапливается статистика вылетов через новую границу. Линии раздела между областями будем называть R-границей и O-границей. На третьем шаге первая и вторая области объединяются в один чёрный ящик, так что бывшая O-граница становится R-границей, и проводится следующая линия – O-граница для третьего шага. И так далее, обычно делается около десяти шагов.

Время трекинга на каждом шаге остаётся неизменным: порядка тысячи времён затухания, но частица проводит его только снаружи R-границы, позволяя получить хорошую статистику во внутренней (II) области. И с каждым шагом эта область будет продвигаться всё дальше на большие амплитуды. Фактор выигрыша на каждом шаге можно оценить двумя способами: как отношение числа рестартов к числу соответствующих вылетов, и как обратную величину от доли времени, которую частица проводит во внешней (III) области. Оба метода дают примерно одинаковый результат, а различие между ними позволяет оценить статистическую погрешность. Полный выигрыш после 8-10 шагов составит несколько порядков.

Показано, что границы должны совпадать с линиями равной плотности (линиями уровня). При этом продвижение в сторону больших амплитуд происходит всегда в той области, где функция распределения была хорошо определена ещё на предыдущем шаге, что обеспечивает хорошую “сшивку” результатов. В противном случае, например, если границы имеют форму дуги окружности, возможна неконтролируемая потеря точности, что демонстрируется на конкретном примере. Выработан критерий, позволяющий оценить достоверность линий уровня и погрешность, которую даёт метод в целом. Определено оптимальное расстояние между последовательными границами и время моделирования на одном шаге.

Наряду с эффектами встречи, существенное влияние на функцию распределения может оказывать упругое рассеяние на остаточном газе. Предложен алгоритм моделирования такого рассеяния. Для того чтобы применить в этом случае описанный выше метод, потребовалась его модификация. Процесс рестарта (вылета частицы за пределы чёрного ящика) теперь усложняется, так как нужно учитывать вероятность рассеяния из ядра на большие амплитуды, когда пересекаются сразу несколько границ. Чтобы статистически верно разыгрывать такие события, на каждом шаге запоминается большой массив точек (координат) во внутренней области, и вычисляется вероятность рассеяться из них за R-границу. В качестве примера рассмотрено равновесное распределение без эффектов встречи для пучка ВЭПП-4М. Время жизни, полученное в моделировании, очень хорошо согласуется с оценкой, которую легко сделать для однократного упругого рассеяния из ядра на апертуру.

В четвёртой главе рассматриваются различные схемы столкновения пучков, и с помощью численного моделирования анализируются основные причины возбуждения и подавления нелинейных резонансов, возникающих из-за эффектов встречи. При лобовой встрече бетатронные резонансы связи возникают из-за нелинейной зависимости Δp_x от y и Δp_y от x , а синхробетатронные – из-за hour-glass эффекта и модуляции азимута “точки интегрального толчка” (ICP), и соответственно вертикальной бетатронной фазы частицы в момент толчка, синхротронными колебаниями. Здесь ICP определяется как точка, где частица пересекает центральный слайс встречного сгустка.

Синхро-бетатронные резонансы усиливаются, если вертикальная бета-функция β_y значительно меньше длины сгустка σ_z . Для подавления этих резонансов можно использовать схему travelling waist: два ВЧ-квадруполь, расположенные недалеко от IP в правильной фазе, сдвигают минимум β_y для частиц с продольной координатой z в ИСР. При этом пропадает модуляция бетатронной фазы в ИСР, что позволяет сделать β_y вдвое меньше σ_z (дальнейшее уменьшение β_y нецелесообразно из-за геометрического фактора падения светимости). Если же оставить $\beta_y \approx \sigma_z$, то предельный сдвиг частоты ξ_y вырастет почти в два раза.

При наличии в IP ненулевой дисперсии, у поперечной координаты частицы появляется синхротронная составляющая. Относительный вклад двух компонент в размер пучка описывается т.н. параметром монохроматизации λ_m . Если $\lambda_m \gg 1$, то вклад бетатронной составляющей x_β в полную координату x становится пренебрежимо малым. При этом пропадает зависимость вертикального толчка Δp_y от горизонтальных бетатронных колебаний, и в результате подавляются резонансы связи. Но если увеличивать λ_m только за счёт уменьшения бетатронного эмиттанса ε_x , он будет “разогреваться” эффектами встречи, уменьшая реальное значение λ_m . Правильный рецепт состоит в уменьшении β_x в месте встречи: тогда пропорционально уменьшается горизонтальный сдвиг частоты ξ_x , горизонтальный эмиттанс не растёт, и резонансы связи подавляются очень эффективно.

При встрече под углом полная горизонтальная координата частицы в системе слайса сильного пучка также имеет синхротронную составляющую, но сдвинутую по фазе на $\pi / 2$. Безразмерный параметр ϕ , характеризующий такую схему, называется “углом” Пивинского – это некий аналог λ_m . Если $\phi < 1$, то характер возбуждаемых резонансов примерно такой же, как с дисперсией; но при дальнейшем увеличении ϕ сходство пропадает. Причина в том, что для плоских пучков при $\phi > 1$ точка “интегрального толчка” ИСР должна быть определена по-другому. Для горизонтального толчка она остаётся старой, а для вертикального – перемещается в точку пересечения частицей центральной оси встречного пучка. При этом появляется зависимость от x_β азимута ИСР, а значит и вертикальной бетатронной фазы.

Если $\phi \gg 1$, то область перекрытия пучков становится много меньше длины сгустка. Это позволяет уменьшить β_y до σ_z / ϕ без потерь от hour-glass эффекта, и таким образом значительно повысить светимость. В такой схеме предельные ξ_y ограничиваются резонансами связи, которые возбуждаются из-за модуляции вертикальной бетатронной фазы в ИСР горизонтальными бетатронными колебаниями. Это очень похоже на модуляцию бетатронной фазы синхротронными колебаниями в лобовой встрече, которая подавляется в схеме travelling waist. При встрече под углом смещение фокуса для частицы с произвольной координатой x_β в её ИСР делается не ВЧ-квадрупольями, а секступольями, расположенными в той же фазе относительно IP. При этом

происходит не сдвиг перетяжки, а её разворот, который и дал название “Crab Waist” всей этой схеме, предложенной P. Raimondi для проекта коллайдера SuperB.

Применение “крабовых” секступолей подавляет резонансы связи и позволяет повысить предельные ξ_y в несколько раз. А с учётом того, что здесь можно получить очень маленькую β_y , такая схема обеспечивает рекордную светимость при стандартном токе и длине сгустка. Схема Crab Waist была впервые опробована на итальянском коллайдере DAΦNE, увеличив его светимость в несколько раз. При этом было получено очень хорошее согласие между экспериментальными данными и результатами моделирования, которые приводятся в диссертации.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A. Gerasimov, D. Shatilov, A. Zholents. “Beam-beam effects with large dispersion function at the interaction point”, Nucl. Instrum. Meth. A305 (1991).
2. Д. Шатилов. “Компьютерное моделирование эффектов встречи на больших амплитудах и определение времени жизни”, препринт ИЯФ 92-79, Новосибирск, 1992.
3. D. Shatilov, A. Zholents. “Lifetime and tail simulations for beam-beam effects in PEP-II B Factory”, In Proc. of PAC’95, Dallas, Texas, 1-5 May 1995.
4. M. Furman, A. Zholents, T. Chen, D. Shatilov. “Comparisons of Beam-Beam Code Simulations”, CBP Tech. Note-59, PEP-II/AP Note 95-04, 1996.
5. D. Shatilov. “Beam-Beam Simulations at Large Amplitudes and Lifetime Determination”, Part. Accel. 52, p. 65, 1996.
6. V. Danilov et al. “The concept of round colliding beams”, In Proc. of EPAC’96, Sitges, Spain, 10-14 Jun 1996.
7. I. Nesterenko, D. Shatilov, E. Simonov. “Comparison of the beam-beam effects simulation with the experimental results obtained on VEPP-2M”, In Proc. of PAC’97, Vancouver, Canada, 12-16 May 1997.
8. K. Hirata, D. Shatilov, M. Zobov. “Beam-Beam Interaction Study for DAΦNE”, Frascati Phys. Ser. 10 (1998) 303-308.
9. M. Biagini et al. “Optimization of DAΦNE beam-beam performance”, In Proc. of PAC’99, New-York, 1999.
10. D. Shatilov, Yu. Alexahin, V. Shiltsev. “Feasibility of the Nonlinear Beam-Beam Compensation at Tevatron”, In Proc. of PAC’01, Chicago, Illinois, 18-22 Jun 2001.
11. D. Shatilov, Yu. Alexahin, V. Shiltsev. “Analytical study and tracking simula-

- tions of the beam-beam compensation at Tevatron”, In Proc. of PAC’01, Chicago, Illinois, 18-22 Jun 2001.
12. D. Shatilov, M. Zobov. “Beam-beam collisions with an arbitrary crossing angle: analytical tune shifts, tracking algorithm without Lorentz boost, crab-crossing”, ICFA Beam Dyn. Newslett. 37, p. 99 (2005).
 13. D. Shatilov, Yu. Alexahin, V. Lebedev, A. Valishev. “Lifetrac code for the weak-strong simulation of the beam-beam effects in Tevatron”, In Proc. of PAC’05, Knoxville, Tennessee, 16-20 May 2005.
 14. A. Valishev, Yu. Alexahin, V. Lebedev, D. Shatilov. “Computational study of the beam-beam effect in Tevatron using the Lifetrac Code”, In Proc. of PAC’05, Knoxville, Tennessee, 16-20 May 2005.
 15. C. Milardi et al. “Wire Compensation of Parasitic Crossings in DAΦNE”, In Proc. of EPAC’06, Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006.
 16. P. Raimondi, D. Shatilov, M. Zobov. "Beam-Beam Issues for Colliding Schemes with Large Piwinski Angle and Crabbed Waist", LNF-07/003 (IR), 2007, arXiv:physics/ 0702033.
 17. P. Raimondi, M. Zobov, D. Shatilov. “Beam-beam simulations for particle factories with crabbed waist”, In Proc. of PAC’07, Albuquerque, New Mexico, 25-29 Jun 2007.
 18. D. Shatilov. “Beam-Beam Resonances for Different Collision Schemes”, In Proc. of 40th ICFA ABDW, Novosibirsk, 2008, arXiv:0806.4070.
 19. P. Raimondi, M. Zobov, D. Shatilov. "Suppression of beam-beam resonances in crab waist collisions", In Proc. of EPAC’08, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008.
 20. О. Анчугов и др. “Физика пучков заряженных частиц на ускорительном комплексе ВЭПП-4”, ЖЭТФ, 2009, т.136, вып. 4(10), стр. 690-702.
 21. C. Milardi et al. "Results from the DAΦNE high luminosity test", Nuovo Cim. C32N3-4 (2009) 379-382.
 22. M. Zobov et al. “Crab waist collision scheme: numerical simulations versus experimental results”, In Proc. of PAC’09, Vancouver, Canada, 4-8 May 2009.
 23. D. Shatilov. “Beam-beam simulations for crabbed bunches”, ICFA Beam Dyn. Newslett. 52, p. 42 (2010).
 24. E. Simonov, E. Levichev, D. Shatilov. "Application of Frequency Map Analysis to Beam-Beam Effects Study in Crab Waist Collision Scheme", In Proc. of IPAC’10, Kyoto, Japan, 23-28 May 2010.
 25. A. Drago, P. Raimondi, M. Zobov, D. Shatilov. "Synchrotron oscillation damping due to beam-beam collisions", In Proc. of IPAC’10, Kyoto, Japan, 23-28 May 2010.

26. D. Shatilov, E. Levichev, E. Simonov, M. Zobov. "Application of Frequency Map Analysis to Beam-Beam Effects Study in Crab Waist Collision Scheme", Phys. Rev. ST Accel. Beams 14 (2011) 014001.
27. A. Drago, P. Raimondi, M. Zobov, D. Shatilov. "Synchrotron oscillation damping by beam-beam collisions in DAΦNE", Phys. Rev. ST Accel. Beams 14 (2011) 092803.
28. A. Valishev, Yu. Alexahin, V. Lebedev, D. Shatilov. "Simulation of beam-beam effects and Tevatron experience", 2012 JINST 7 P12002.
29. J.L. Abelleira et al. "Local Chromatic Correction Scheme and Crab-Waist Collisions for an Ultra-Low beta* at the LHC", In Proc. of IPAC'12, New Orleans, USA, 20-25 May 2012.

ШАТИЛОВ Дмитрий Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВСТРЕЧИ
В ЦИКЛИЧЕСКИХ КОЛЛАЙДЕРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 16.04. 2013 г.

Подписано в печать 17.04. 2013 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11