

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Корчуганова Владимира Николаевича на диссертацию Шильцева Владимира Дмитриевича
«Электронные линзы для суперколлайдеров»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в
диссертационный совет Д 003.016.03 на базе ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН

Актуальность темы

Современные суперколлайдеры, обеспечивающие столкновения противоположно заряженных частиц сверхвысоких энергий, широко известны своими открытиями в физике и многими технологическими достижениями (Tevatron, RHIC и LHC). Светимость коллайдеров достигла рекордно высоких значений - выше $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Их сложность и очень высокая стоимость требуют от создателей гарантированного обеспечения наивысшей производительности, а именно - высокой светимости и времени жизни встречных пучков.

При проектировании коллайдеров, конечно, пытаются учесть и минимизировать воздействие известных вредных эффектов. Однако остаются параметры машины, например такие, как импеданс, скорости потерь частиц и эмиттансов пучков, влияние которых проявляется (становится понятным) только в процессе работы машины. Поэтому тем более актуальным является каждое новое устройство, установленное на кольце коллайдера, позволяющее стабилизировать параметры встречных пучков близко к расчетным значениям.

В 1997 году автор и коллеги предложили для компенсации паразитных и лобовых эффектов встречи в протон-антипротонном коллайдере Tevatron так называемые *электронные линзы*. Всеобъемлющая теория электронных линз для компенсации паразитных (long-range) взаимодействий и детальный анализ конструктивных требований были разработаны в 1999 году.

Электронные линзы — это электронные пучки низкой энергии, удерживаемые во внешнем продольном магнитном поле, собственные электромагнитные поля которых используются для активного манипулирования циркулирующими пучками в ускорителях высоких энергий. Требуемая форма (плоская, гауссова, полая и т.д.) поперечного распределения плотности и необходимая интенсивность в пучке электронов создается при помощи внешней электронной пушки. Помещение приготовленного таким образом пучка электронов в сильное продольное магнитное поле позволяет создавать очень стабильные в поперечном направлении, яркие и тонкие пучки различных профилей и желаемой плотности.

Диссертационная работа В.Д. Шильцева посвящена, во-первых, детальной разработке впервые предложенных методов компенсации паразитных эффектов встречи, продольной и поперечной коллимации, компенсации эффектов пространственного заряда при помощи электронных линз (ЭЛ); во-вторых, определению на основе требований динамики пучков в суперколлайдерах, основных физических параметров ЭЛ.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Автором были впервые предложены, построены и успешно использованы две ЭЛ в протон-антипротонном коллайдере Tevatron в 2001 и 2004 годах, а в дальнейшем этот опыт использован в строительстве двух ЭЛ для RHIC. Проведен анализ и численное моделирование взаимодействия электронных пучков ЭЛ и адронных пучков в суперколлайдерах для оценки эффективности работы электронных линз и проверки аналитических оценок эффективности и критериев устойчивости. Определен оптимальный электромеханический дизайн электронных линз, включая магнитную систему с прецизионными СП соленоидами, электронные пушку и коллектор, систему с рекуперацией энергии электронного пучка, вакуумную систему, высоковольтный модулятор анода, систему пучковой диагностики.

Электронные линзы представляют собой новый инструмент для ускорителей заряженных частиц высоких энергий, в частности, для сверхпроводящих адронных коллайдеров. Они позволили впервые продемонстрировать компенсацию паразитных эффектов встречи пучков путем сдвига бетатронных частот отдельных сгустков и провести пионерские эксперименты по

компенсации лобовых эффектов встречи и по коллимации протонов и антипротонов трубчатым электронным пучком.

Практическая ценность результатов

В работе исследованы требования, физические ограничения и практические проекты ЭЛ, построены две линзы для *протон-антипротонного суперколлайдера* Tevatron и их опыт использован в строительстве двух ЭЛ для RHIC. В обоих коллайдерах работа ЭЛ привела к значительному увеличению интегральной светимости. Кроме компенсации эффектов встречи и коллимации, разработанные методы с использованием ЭЛ позволяют существенно уменьшить эффекты пространственного заряда в сильноточных ускорителях. Электронные линзы показали свою большую эффективность в компенсации паразитных эффектов встречи для протонов, эффектов встречи лоб-в-лоб для антипротонов. Они же продемонстрировали настолько высокую эффективность удаления незахваченных в ВЧ сепаратрисы протонов и антипротонов из впускных промежутков между группами сгустков, что с 2001 года до конца работы Tevatrona в 2011 году, постоянно, в режиме «24/7», использовались для продольной коллимации пучка. Поперечная коллимация с помощью электронных линз с полым электронным пучком была предложена автором в 2006 г., и одна из двух TEL использовалась для успешной демонстрации коллимации трубчатым пучком электронов в 2010–2011 годах.

Теоретическое и экспериментальное изучение ЭЛ активно продолжается в Большом адронном коллайдере – LHC CERN. Технологии изготовления электронных линз могут быть использованы в суперколлайдере LHC и будущих коллайдерах FCC и SpnC.

Общая характеристика и содержание работы

Диссертация В.Д. Шильцева состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Текст диссертации содержит 205 страниц, 115 рисунков, 15 таблиц. Список литературы состоит из 242 работ.

Во введении кратко обоснована актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, сформулированы основные цели работы, а также в сжатой форме изложено содержание отдельных глав.

Первая глава носит вводный характер. В ней изложены основы метода встречных пучков, краткая история адронных сверхпроводящих суперколлайдеров, основные проблемы динамики пучков в суперколлайдерах, а также дан обзор метода электронных линз и их практического применения для решения вопросов на пути к высокой производительности таких ускорителей.

Предваряя изложение метода электронных линз, автор диссертации детализирует паразитные эффекты, ограничивающие динамику пучков и светимость в адронных суперколлайдерах, и их следствия:

- *Эффекты встречи и другие эффекты столкновений;*
- *Однопучковые эффекты в адронных коллайдерах;*
- *Импеданс и коллективные неустойчивости;*
- *Проблемы коллимации и защиты машины от потерь пучка и детекторов от фона частиц гало.*

Вторая глава посвящена описанию технологии электронных линз — от подсистем до пучковой диагностики и интеграции в структуру ускорительных колец. Основы технологии и методы применения электронных линз отработаны и опробованы в протон-антипротонном коллайдере Tevatron в 2001–2011 гг. Представлены основные требования к электронным линзам для различных применений в коллайдерах SSC, Tevantron, RHIC, LHC, в т. ч. для компенсации эффектов встречи лоб в лоб, компенсации паразитных эффектов встречи, коллимации полым электронным пучком и компенсации эффектов пространственного заряда. Удовлетворение этим требованиям является довольно сложной задачей из-за сильного расталкивания электронов в интенсивном пучке электронной линзы. Для пучка электронов с энергией 10 кэВ, требуемое магнитное поле вблизи электронной пушки составляет 0,15 Т. Магнитное поле в соленоиде, необходимое для поддержания стабильности пучка антипротонов и уменьшения коэффициента $x-y$ связи из-за искажений пучка электронов, составляет около 3–6 Т, то есть коэффициент магнитного сжатия может быть порядка 20 и более. В сильном поле магнитная фокусировка полностью определяет динамику электронов. Орбиты электронов могут быть представлены в виде

ларморовских кружков микронных размеров, движущихся вдоль силовых линий. Поперечный размер электронного пучка должен быть примерно такой же или сравним со среднеквадратичным размером протонного пучка, т. е., как правило, порядка 1 мм.

Форма поперечного распределения тока ЭЛ зависит от конкретного применения ЭЛ. Нелинейная компенсация лобовых эффектов встречи требует точного контроля распределения поперечной плотности заряда электронов с помощью прикатодных электродов в диодной электронной пушке

Приводятся необходимые геометрические и физические параметры ЭЛ. Нужные токи пучка электронов, варьируется от 0,3 А до 20 А, энергии электронного пучка в диапазоне от 5 до 80 кэВ и поперечные размеры пучка электронов в диапазоне от 0,1 мм до 3,5 мм, с типичной длиной линз от 2 до 4 м. Требуемая модуляция тока в диапазоне от 100 нс до постоянного тока.

Показано, что лобовое столкновение с круглым (анти) протонным пучком в сильном магнитном поле сохраняет осевую симметрию электронного пучка и лишь в минимальной степени влияет на его радиальный размер. Таким образом, силы объемного заряда электронного пучка одинаковы для антипротонов в голове и в хвосте антипротонного сгустка.

Теоретически рассмотрены основные явления, влияющие на снижение эффективности применения ЭЛ в коллайдерах:

- *Паразитные эффекты влияющие на пучки высоких энергий;*
- *Искажения формы электронного пучка;*
- *Действие на второй пучок;*
- *«Head-tail» эффект из-за электронного пучка;*
- *Флуктуации электронного тока;*
- *Поперечное движение электронов;*
- *Качество поля в соленоиде.*

Для Tevatrona были построены две электронные линзы (Tevatron Electron Lenses, TEL-1 и TEL-2) и установлены в двух разных местах кольца, в 2001 и 2004 годах, соответственно. Соленоиды были изготовлены в ИФВЭ (Протвино, Россия) и испытаны в Fermilab (США). Главный сверхпроводящий соленоид TEL способен достичь максимального поля 6,5 Тл. Пушечный и коллекторные соленоиды генерируют максимальное поле около 0,4 Тл. Силовые линии в центре соленоида отклоняются не более, чем на 200 мкм в горизонтальном направлении, и только на 45 мкм в вертикальном положении. Среднеквадратичные отклонения магнитных линий 15 мкм в вертикальной плоскости и 50 мкм в горизонтальной плоскости. Изменения положения силовых линий при изменении поля СП соленоида не превышают 20 мкм. Силовые линии соленоида, находящиеся на расстоянии ± 1 мм друг от друга, остаются параллельными в пределах ± 6 мкм. Поэтому электронный луч TEL способен окружить антипротонный по всей длине соленоида.

Линзы TEL-1 и TEL-2 были использованы в трех режимах работы: а) для компенсации эффектов встречи пучков; б) для удаления незахваченных частиц из промежутков между сгустками (bunch trains), а также в) для поперечной коллимации пучками электронными пучками.

Система Электронного Пучка. Электронные пушки. Коллектор электронного тока. Электрическая схема. Высокая плотность тока, быстрая модуляция и требование гладкого профиля плотности тока в ЭЛ привело к выбору электронной пушки с выпуклым катодом с модуляцией тока анодным напряжением (то есть, без сетки).

В коллекторе электронного пучка TEL магнитное поле конфигурируется так, чтобы силовые линии в коллекторном соленоиде расходились, и электроны, следуя линиям поля, поглощались на гораздо большей площади охлаждаемого медного коллектора.

Модуляция электронного пучка. Эффекты встречи являются уникальными для каждого протонного или антипротонного сгустка в Tevatrone, и, соответственно, их компенсация требует варьировать электронные токи, подготовленные для каждого сгустка.

Для TEL были разработаны и испытаны несколько различных типов высоковольтных анодных модуляторов. Наиболее подходящими для работы TEL-1 (с 2001 года) были модуляторы на основе усилителей на ВЧ-лампах (фронты импульса напряжения ≈ 300 нс, длительность импульса 800–1200 нс, амплитудная стабильность 0,02). Для TEL-2 использовался твердотельный генератор Маркса (импульсы напряжения 6 кВ, длительности 600 нс, частотой 47,7 кГц, фронтами 150 нс). *Система диагностики и другие подсистемы.* TEL оснащены четырьмя мониторами положения пучка (пикап-электроды, ДПП): по одному по вертикали и горизонтали, в начале и в конце основного соленоида. Статистическая погрешность измерения положения ≈ 10 –20 мкм от

минимума до максимума. В результате улучшения работ подсистем ЭЛ колебания в токе уменьшены до менее, чем одного процента, с тем чтобы свести к минимуму рост эмиттансов 980 ГэВ-ных (анти) протонов. Удалось добиться вариации времени начала электронного импульса менее 1 нс и за счет этого получить очень хорошие времена жизни протонов.

В третьей главе обсуждается применение электронных линз для компенсации последствий эффектов встречных взаимодействий пучков в коллайдерах: лоб в лоб (head-on) и паразитных (long-range).

В серии первых пучковых экспериментов с электронными линзами в Tevatrone измерялись зависимости бетатронных частот протонов dQ_x и dQ_y от пикового тока электронов и от положения электронного пучка. *В целом, экспериментально наблюдаемые сдвиги бетатронных частот 980 ГэВ протонов и антипротонов, вызываемые TEL, неплохо согласуются с теоретическими предсказаниями.*

Были оценены эффекты, возникающие из-за дефектов и шумов электронного пучка, а также влияния профиля плотности тока электронов на потери пучка. Экспериментально показано, что увеличение роста эмиттанса, согласно теории, растёт, как квадрат амплитуды флуктуаций. Высокоинтенсивные пучки протонов и антипротонов в Tevatrone, без TEL, имеют типичный рост эмиттанса 0,04–0,2 п мм мрад/ч, а при работающей TEL (электронная пушка с прямоугольным профилем плотности тока), с максимальными флуктуациями тока около 3 мА (от пика до пика) скорость роста эмиттанса была не выше, чем 0,01 мм-мрад/ч.

Использовались три типа электронных пушек — с плоской вершиной, гауссова и со сглаженными краями (SEFT) распределения плотности тока. Было экспериментально показано, что использование Гауссовой электронной пушки дало значительное улучшение времени жизни частиц.

В 2004–2006 годах, после того, как на Tevatrone были улучшены стабильность орбиты - лучше 0.1 мм, точность ДПП - около 0.1 мм, была установлена вторая TEL с электронными пушками со сглаженным краем SEFT, началось успешное применение ЭЛ для компенсации паразитных эффектов встречи (ПЭВ) на регулярной основе и повторяемым образом. После ввода в эксплуатацию всех этих функций и достижения стабильной работы, было получено значительное улучшение времени жизни пучка протонов под действием электронных линз.

Основными результатами пионерских исследований компенсации паразитных эффектов являются разработка электронных линз, демонстрация их совместимости с работой сверхпроводящего адронного коллайдера и экспериментальное доказательство компенсации эффектов встречи в протон-антипротонном коллайдере. Результаты исследований показали, что сдвиг частот протонов и антипротонов из-за электронных линз подчиняется расчетам и является предсказуемым. Наблюдаемое улучшение времени жизни протонов в начале захода коллайдера (когда яркость пучков и светимость являются самыми высокими, а взаимодействие самым сильным) может быть порядка ~ 2 .

Экспериментально было показана необходимость плавного поперечного распределения плотности тока электронов, без резких краев, и хорошее нацеливание электронного пучка на протоны (или, если требуется, на антипротоны) — в пределах доли среднеквадратичного размера пучка протонов или антипротонов; а также низкие шумы и пульсации в токе и положении электронного пучка.

Установлено, что когерентные неустойчивости из-за взаимодействия пучка (анти) протонов с электронным пучком, отсутствуют.

Экспериментально и теоретически найдено, что компенсация сдвигов и разбросов бетатронных частот, как результата лобового взаимодействия пучков, требует соблюдения нескольких условий: эффективное число электронов в ЭЛ равно числу протонов; электронный пучок должен иметь тот же поперечный размер, что и пучок протонов в месте взаимодействия; идеальные места для электронных линз должны иметь, по возможности, нулевую или малую дисперсионную функцию, во избежание синхробетатронных эффектов; равные горизонтальные и вертикальные бета-функции, и иметь набегу бетатронных фаз от основных мест встречи до ЭЛ кратными 2π .

Прирост вертикального эмиттанса антипротонных сгустков зависит от бетатронной частоты антипротонов, в частности, от того, насколько близок каждый из пучков к какому-нибудь важному резонансу. Экспериментально показано замечательное распределение эффекта вдоль цепочки

сгустков, по виду напоминающее «гребешки» — сгустки на концах каждой цепочки имеют более низкий рост эмиттанса, чем сгустки в середине. Было отмечено, что изменения настройки вертикальной частоты порядка $-0,002$ часто приводили к уменьшению амплитуды «гребешков». Меньший эффект «гребешков» также наблюдался и в протонах.

Накопленный успешный опыт экспериментального использования электронных линз на Tevatron послужил примером их эффективного использования на других машинах. В 2015 году две гауссовы электронные линзы были успешно использованы для частичной компенсации эффектов встречи в коллайдере RHIC, работавшем в режиме столкновения двух 100 ГэВ поляризованных протонных пучков.

В связи с планами увеличения светимости до $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, то есть до величины в 10 раз выше проектной, было проведено численное моделирование динамики частиц при компенсации эффектов встречи с помощью ЭЛ в проекте High Luminosity LHC Upgrade. . Расчеты показывают, что эффективность компенсации в LHC быстро растет с параметром ξ . Потери протонов уменьшаются почти в два раза при удвоенной интенсивности и в четыре раза для утроенной интенсивности.

В четвертой главе обсуждается применение электронных линз для коллимации поперечного и продольного гало пучка. Коллимация пучков является одной из самых сложных проблем для сверхпроводящих адронных коллайдеров высоких энергий. Рекордная плотность мощности (мощности на единицу площади пучка) делает коллимацию таких пучков чрезвычайно сложной и актуальной задачей .

Электронные линзы в Tevatrone дали возможность проведения первоначальных экспериментальных исследований концепции *коллимации полым электронным пучком*. Для этой цели была спроектирована и построена электронная пушка с полым оксидно-вольфрамовым катодом. Идеальный круглый полый электронный пучок не имеет электрических или магнитных полей внутри себя и генерирует сильные нелинейные поля снаружи. Если таким электронным пучком окружить циркулирующий пучок (анти) протонов, то он будет толкать частицы гало *в поперечном направлении* и оставит ядро пучка невозмущенным. Соответствующие исследования завершились успешной демонстрацией этого нового метода управления гало. В эксперименте наблюдалось, что относительное изменение светимости было намного меньше, чем изменение интенсивности, что является явным признаком коллимации гало, т. е. тех частиц, которые не вносят вклада в светимость. Электронные линзы с трубчатым пучком в настоящее время активно исследуются как элемент системы коллимации для LHC.

Продольная коллимация электронными линзами. Частицы, не захваченные системой ВЧ ускорителя, и, следовательно, не синхронизированные с ней, представляют собой серьезную угрозу для суперколлайдеров.

Было установлено, что электронная линза (TEL) очень эффективно удаляет незахваченные протоны при настройке по времени в промежуток между цепочками сгустков («зазор»), и если она работает в резонансном режиме возбуждения.

В пятой главе обсуждается применение электронных линз помимо компенсации эффектов встречи и коллимации. В число наиболее активно изучаемых и разрабатываемых идей и предложений входит компенсация эффектов пространственного заряда (КЭПЗ) в протонных ускорителях высокой интенсивности, в том числе в инжекторах супер-коллайдеров; достижение интегрируемой нелинейной динамики пучка для подавления образования гало и потерь частиц в протонных кольцах с пучками высокой яркости; селективный медленный вывод частиц из ускорителей; компенсация эффектов встречи в e^+e^- коллайдерах и электрон-ионных коллайдерах, система для создания разброса частот для затухания Ландау и подавления когерентных неустойчивостей пучков, и «пучок-пучковый кикер».

Фокусировка за счет ЭЛ, может или точно, или частично компенсировать действие пространственного заряда при выполнении условий:

1) поперечный профиль электронного заряда $n_e(r)$ имеет такой же профиль, как и у пучка протонов;

2) интегральное воздействие электронов равно общему воздействию пространственного заряда протонов по периметру кольца;

3) временная структура силы пространственного заряда электронов совпадает с временной структурой силы пространственного заряда протонов.

Интегрируемая нелинейная динамика пучков. Установлено, что, во-первых, более короткие электронные линзы позволяют добиться лучшего соответствия временного профиля электронов и короткого импульса тока протонного сгустка, во-вторых, более высокая степень периодичности фокусирующей оптики кольца помогает улучшить одночастичную и коллективную стабильность. Оба эти эффекта требуют большего числа ЭЛ с более короткой длиной.

Численное моделирование КЭПЗ для кольца Fermilab Booster (8 ГэВ) показало, что поддержание высокой периодичности фокусирующей решетки P имеет решающее значение и для компенсации пространственного заряда.

Экспериментальная демонстрация компенсации эффектов пространственного заряда с электронными линзами является одной из ключевых целей программы на тестовом ускорителе ЮТА (Integrable Optics Test Accelerator (ЮТА)), который строится в Fermilab. Кроме исследований по КЭПЗ с гауссовой электронной линзой на ЮТА планируется изучить эффект от интегрируемых электронных линз и от т.н. «электронных колонн». Концепция нелинейной интегрируемой оптики (ИО) применительно к ускорителям предполагает наличие небольшого количества специальных нелинейных фокусирующих элементов, добавленных в оптику обычного кольца для того, чтобы позволить иметь уникально большие разбросы частот при сохранении динамического апертуры. Концепция ИО обещает улучшенную стабильность к возмущениям и смягчение коллективных неустойчивостей через затухание Ландау.

Автором предложено использование электронной линзы для *медленного селективного вывода протонов* из Fermilab Main Injector — 3,3 км 120 ГэВ протонного синхротрона с использованием сдвига бетатронной частоты высокоэнергетичного пучка к нелинейному резонансу.

Одним из наиболее эффективных способов подавления коллективных неустойчивостей интенсивных пучков является *затухание Ландау*, которое требует введения разброса бетатронных частот, как правило, порядка нескольких тысячных (0,001). Автором было предложено использовать электронные линзы с пучками гауссовой формы, которые будут обеспечивать разброс частот исключительно в ядре пучка, не ухудшая динамики частиц в поперечном гало. Приведены расчетные параметры электронной линзы для ЛНС, позволяющие стабилизировать с помощью затухания Ландау протонный пучок с двойной, по сравнению с проектной, интенсивностью протонов ($2,3 \cdot 10^{11}$).

Для решения задачи многооборотного ввода и вывода индивидуальных сгустков (анти)протонов автором предложен новый *метод очень быстрого кикера* на основе ЭЛ. В таком «пучок-пучковом» кикере электрическая и магнитная силы сверхкороткого электронного пучка низкой энергии с высоким пиковым током, введенного в вакуумную камеру накопительного кольца, создают удар в одном направлении. Электронный сгусток затем выходит из вакуумной камеры в коллектор до прихода следующего сгустка высокой энергии. Метод может позволить ввод или вывод отдельных сгустков, следующих всего лишь на нескольких десятках сантиметров друг за другом, и в системе впуска и экстракции накопительного кольца e^+e^- коллайдера.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту. Их суть изложена выше в разделах «Актуальность...», «Новизна...», «Практическая ценность...».

Оценка содержания диссертации, её завершенность.

Результаты диссертации теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены. Фактически, диссертация является законченным научным трудом и самым настоящим учебником для физиков-ускорительщиков, участвующих в проектах настоящих и будущих суперколлайдеров.

Представленная к защите работа прошла серьезную **апробацию**: результаты, полученные в ходе ее выполнения, много раз были опубликованы в статьях в реферируемых научных журналах и многократно докладывались на международных и российских конференциях. По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ в международных и российских журналах, входящих в список ВАК по направлению «Физика» (из них 3 за последние 5 лет). Следует отметить, также, что уже после представления диссертации вышла статья V. Shiltsev, Y. Alexahin, A. Burov, and A. Valishev «Landau Damping of Beam Instabilities by Electron Lenses» в журнале Phys. Rev. Lett. 119, 134802.

Личный вклад. Неоспорим огромный личный вклад В.Д. Шильцева в работу по теоретическому обоснованию и созданию систем, описанных в диссертации. Им лично были предложены и в значительной степени реализованы многие ключевые решения, связанные с проектом Электронных Линз. Под его непосредственным руководством была создана оптическая система ЭЛ, для которой он лично спроектировал все компоненты и принимал участие в их реализации, разработаны и осуществлены экспериментальные методики, подтвердившие высокую эффективность применения ЭЛ в суперколлайдере Tevatron.

Замечания. Среди таковых можно привести следующие замечания:

1. **Выражения, трудные для понимания.** Стр.25. «Дополнительные осложнения динамики пучков могут происходить из-за того, что размеры пучков в местах встречи неодинаковы между пучками или между вертикальной и горизонтальной плоскостями...»; Стр.90. «Для уменьшения шума V_i рассчитывались, как интеграл профиля заряда сгустка, который, в свою очередь, является интегралом сигнала дублета, наведенного при прохождении пучка».
2. **Опечатки.** Стр.73, 75. Размерность микропервеанса - «мкА/В^{3/2}», а не «мА/В^{3/2}»; Стр.109. «В этом эксперименте радиус электрона был 1.6 мм...»; Стр.164. Вместо r^4 в тексте - $r^2 = (x^4 + 2x^2y^2 + y^4)$; Стр.170. Следующее выражение, относящееся к формуле (5.1): «Таким образом, сдвиг частоты для частиц в сердцевине пучка больше, чем для частиц в поперечном или продольном «хвосте» функции распределения», следует, по-видимому, читать, согласно (5.1), «... сдвиг частоты для частиц пучка увеличивается от центра к «хвостам» поперечной функции распределения, а в продольном направлении сдвиг уменьшается от центра продольного распределения пучка к его «хвостам».
3. **Оформление.** Стр.137. Сбой в нумерации параграфов: вместо 4.1.1. сразу идет 4.1.2; Стр.138. Рис.4.2.а,б. - Мелкие рисунки и подписи к ним; Стр.161. Повтор последнего абзаца со стр.160.

Ни одно из этих замечаний, конечно же, ни в коей мере не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования, не снижают значимости и уровня выполненной автором работы и не касаются положений и выводов, вынесенных автором на защиту.

Заключение о соответствии диссертации критериям ВАК. Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации. Диссертационная работа В.Д. Шильцева является законченным научным исследованием. По научному уровню, новизне результатов и объему она удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, соответствует паспорту специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, и критериям, установленным в п. п. 10, 11 и 14 «Положения о присуждении учёных степеней». Автор диссертации В.Д. Шильцев заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент _____ Корчуганов Владимир Николаевич
Доктор физ.-мат. наук
Заместитель руководителя Научного комплекса
по перспективным ускорительным технологиям
НИЦ «Курчатовский институт»
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Телефон: 84951967257
e-mail: vnkorchuganov@mail.ru

Подпись В.Н. Корчуганова заверяю
Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»
Дата: _____



Стремоухов С.Ю.
2017 г.