

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора физико-математических наук Иванова Сергея Владиславовича на диссертацию ШИЛЬЦЕВА Владимира Дмитриевича на тему “Электронные линзы для суперколлайдеров”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АКТУАЛЬНОСТЬ

Актуальность избранной темы диссертации не вызывает сомнений. Действительно, в современной экспериментальной физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий максимальные энергии взаимодействия частиц в системе центра масс достигнуты в больших кольцевых ускорителях и накопителях встречных сталкивающихся пучков адронов (протоны, антипротоны, ядра). Это уникальные научные установки мега-класса — супер-коллайдеры (Tevatron и RHIC, США; LHC, Западная Европа). Их сооружение и работа требует использования значительных инвестиционных и эксплуатационных ресурсов. В этом контексте оказываются востребованными и актуальными любые (технически реализуемые) инженерно-физические и технические средства, нацеленные на повышение эффективности использования таких установок. (Мерой их эффективности с точки зрения физического эксперимента являются светимость столкновений, постоянная времени спада светимости, интеграл светимости за отчетный период.)

Электронные линзы (далее сокращенно — ЭЛ), рассматриваемые в диссертации, относятся к такому именно классу средств и систем современной техники ускорителей заряженных частиц. Их важной особенностью является четкая ориентация на обслуживание тех аспектов динамики пучков заряженных частиц, которые типичны и критичны для супер-коллайдеров. К их числу относятся:

- Нелинейные и линейные эффекты встреч (электромагнитного взаимодействия) циркулирующих пучков — лобовых столкновений сгустков в точке взаимодействия физического детектора и на дальнем расстоянии в паразитных точках встреч сгустков разведенных пучков на орбите (взаимодействие дальнего, масштаба 10σ пучка, действия).
- Учет нелинейных поперечных магнитооптических резонансов высоких порядков, проявляющихся при особо длительных временах накопления (циркуляции) пучков.
- Образование гало пучка (на поперечной и продольной фазовых плоскостях) благодаря слабым деструктивным механизмам, становящимся заметными при длительных временах циркуляции. Меры противодействия (например, коллимация пучков) необходимы как для защиты сверхпроводящей магнитной системы от неконтролируемых потерь частиц и связанных с этим тепловыделением при криогенных температурах, так и для уменьшения фоновой паразитной загрузки детекторов физических экспериментов в режиме набора статистики.
- Локальные некогерентные эффекты пространственного заряда ярких сгустков — кулоновский сдвиг бетатронной частоты и нелинейность бетатронных колебаний из-за собственного поля пучка.

Этот, возможно и неполный, список значимых эффектов динамики частиц, с контролем над которыми имеет дело технологическая система ЭЛ в большом накопителе, убедительно свидетельствует об актуальности темы обсуждаемой диссертационной работы.

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, хорошо обоснованы и достоверны. В пользу этого утверждения свидетельствуют несколько обстоятельств.

Автор диссертации владеет арсеналом ключевых положений и методов современных разделов физики пучков заряженных частиц и техники ускорителей и накопителей. Методики расчета и компьютерные программы моделирования динамики пучков заряженных частиц верифицированы с помощью экспериментов на реальных интенсивных релятивистских пучках.

Результаты диссертации обобщают многолетний опыт практической работы автора на успешно действовавшем протон-антипротонном коллайдере Tevatron (FNAL, США). Результаты, выносимые на защиту, подтверждаются большим объемом документированных экспериментальных данных, приведенным в диссертации. Разработанные технологические системы ЭЛ и процедуры их применения прошли проверку на практике и были введены в эксплуатацию (почти 10 лет работы в сеансах).

Представленные инженерно-физические расчетные и опытно-конструкторские решения по электромеханической части ЭЛ с продольным магнитным полем, расположенной на орбите накопителя, несомненно, учитывают опыт ИЯФ СО РАН (Новосибирск) по изготовлению и вводу в эксплуатацию многочисленных систем электронного охлаждения ионных пучков на разных ускорителях мира. Опора на подобные компетенции является еще одним аргументом в пользу обоснованности рекомендаций и решений, изложенных в диссертации.

Косвенным подтверждением высокого рейтинга обоснованности и достоверности результатов диссертации является их широкое признание ускорительным сообществом, которое планирует к использованию или уже использует системы ЭЛ в накопителях RHIC, LHC (конфигурация HL-LHC), опция для проектов IOTA, FCC.

НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ

Вопрос новизны полученных в диссертации результатов имеет три аспекта.

В-первых, эта новизна с необходимостью диктуется самим объектом внедрения обоснованной и разработанной системы ЭЛ. Это уникальная (действовавшая) научная установка — большой сверхпроводящий протон-антипротонный коллайдер Tevatron (FNAL, США). Установка — единственная в своем классе. Многие ее существенные технологические системы (а к ним относится ЭЛ) были востребованы и реализованы на практике впервые в мире и потому обладают всеми элементами новизны.

Во-вторых, сами проблемы динамики пучков заряженных частиц, решаемые с помощью системы ЭЛ, вышли на первый план и потребовали надлежащего обслуживания с помощью новой (отдельной) технологической системы впервые в технике ускорителей и накопителей заряженных частиц. Ранее эти эффекты попросту не были столь критичны на практике.

В-третьих, собственно концепция электронных линз как средства для компенсации эффектов встреч в коллайдерах была предложена автором диссертации (1997 год).

ЗНАЧИМОСТЬ

Диссертация имеет высокую научно-практическую значимость.

В работе решена целостная последовательная расчетно-теоретическая и практическая задача по физическому обоснованию, инженерно-физическому расчету параметров, разработке опытно-конструкторских решений системы ЭЛ. Проведены пуско-наладочные эксперименты на пучке действовавшего ускорителя заряженных частиц. Система ЭЛ была успешно переведена в режим штатной эксплуатации и активно использовалась по назначению.

Опыт практической работы на большом накопителе Tevatron (FNAL, США) подтвердил достижение проектных параметров. Система ЭЛ обеспечила наблюдаемое улучшение ключевых параметров эффективности коллайдера — увеличение его светимости, рост времени жизни светимости и достижение высоких значений интеграла светимости. Подтверждена работо-

способность и востребованность системы ЭЛ в режиме коллимации интенсивного циркулирующего пучка. Предложены иные варианты применения ЭЛ (например, компенсация линейных и нелинейных эффектов пространственного заряда в интенсивных ускорителях протонов).

Результаты диссертации планируются к использованию на иных действующих (RHIC) и проектируемых (HL-LHC, IOTA) ускорительных и накопительных установках.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы насчитывает 205 стр., включая 3 приложения на 3 стр. и список литературы (242 позиции) на 17 стр. Текст диссертации тщательно оформлен.

Во **введении** сформулирована цель работы, обоснована актуальность и практическая значимость проблемы создания систем электронных линз для современных кольцевых накопителей встречных сталкивающихся адронных пучков. Сформулированы основные цели работы. Приведены основные статистические и наукометрические сведения о диссертационной работе.

Первая глава имеет обзорный характер. В ней изложены основы метода встречных пучков и приведена краткая историческая справка о больших сверхпроводящих адронных коллайдерах. Текст сопровождается большим объемом числовых данных и сравнительных характеристик установок.

Приведен содержательный обзор актуальных проблем динамики частиц, ключевых для рассматриваемого класса ускорительных установок. Эта часть главы представляет особый интерес, поскольку она принадлежит перу эксперта, в течение длительного времени работающего в этом секторе современной физики и техники ускорителей и накопителей пучков заряженных частиц. Расставленные приоритеты имеют под собой практический опыт работы. Методическая и справочно-информационная ценность главы не вызывает сомнений.

Глава убедительно представляет контекст, в котором возникло предложение о применении ЭЛ, их место и роль в совокупности физических задач, решаемых в накопителях со встречными сталкивающимися пучками.

Вторая глава содержит исчерпывающее описание методики инженерно-физического расчета оптимальной электромеханической схемы ЭЛ, непосредственно обращенной к циркулирующему пучку либо находящейся вблизи орбиты (катодный узел, коллектор-рекуператор, соленоиды, системы диагностики электронного пучка.). Глава подтверждает, что опытно-конструкторская часть разработки ЭЛ по праву относится к значимым результатам диссертации, выносимым на защиту.

В третьей главе приведены результаты практического применения систем ЭЛ в протон-антипротонном накопителе Tevatron (FNAL, США) по ее *первому целевому назначению* — для компенсации нелинейных и линейных эффектов встреч (лобовых и паразитных, на больших расстояниях). По оценкам автора, эти эффекты отвечают примерно за 1/4–1/3 эксплуатационных потерь интеграла светимости.

Совокупность приведенных экспериментальных результатов убедительно доказывает, что рассматриваемая система функционирует в соответствии с проектными параметрами. Получено наблюдаемое увеличение интеграла светимости установки.

В четвертой главе приведены результаты практического применения систем ЭЛ в протон-антипротонном накопителе Tevatron (FNAL, США) по ее *второму целевому назначению* — для продольной и поперечной коллимации гало циркулирующего пучка. В этих целях производилось, соответственно, импульсное поперечное электромагнитное воздействие на пучок в разрывы между пакетами сгустков или прилагались внешние электромагнитные поля трубчатого (полого) электронного пучка. Оба применения важны для (1) локализации потерь пучка и защиты сверхпроводящей магнитной системы и (2) для уменьшения паразитной фоновой загрузки детекторов физических экспериментов в режиме набора статистики.

Вместе **третья и четвертая главы** содержат основной объем экспериментальной информации, подтверждающий достоверность результатов диссертации и факт их практического применения в действовавшей установке. Уже этого объема диссертации было бы достаточно для положительной аттестации автора.

Пятая глава посвящена альтернативным перспективным направлениям использования систем ЭЛ, в основном, за пределами чисто коллайдерной тематики. Главное внимание уделено проблеме компенсации пространственного заряда интенсивного протонного пучка в кольцевом ускорителе. Известно, что некогерентный кулоновский сдвиг бетатронной частоты является основным деструктивным эффектом, ограничивающим интенсивность пучка в инжекционных каскадах ускорения. Поэтому меры противодействия этому эффекту представляют самостоятельный практический интерес.

Рассмотрена возможность использования систем ЭЛ для создания локальной (параксиальной) области с увеличенным разбросом бетатронных частот для противодействия поперечным когерентным неустойчивостям пучка с помощью усиленного затухания Ландау. Справедливо отмечено ограничение на возможность использования в этих целях октапольных магнитных линз: Они создают полно-апертурную нелинейность магнитного поля, ограничивающую динамическую апертуру накопителя при больших амплитудах бетатронных колебаний.

Предложено использовать системы ЭЛ либо их функциональные аналоги и для иных нетрадиционных применений — компенсации эффектов встреч в электрон-позитронных накопителях со встречными пучками, в системах медленного вывода пучка, в дефлекторных устройствах. Эти предложения демонстрируют гибкость и потенциал систем ЭЛ, обсуждаемых в диссертации. Однако вопрос их широкого практического применения в этих целях в ближайшей перспективе пока остается неясным.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации. Они же являются положениями, которые выносятся на защиту. Их перечень соответствует тексту диссертации.

ЗАМЕЧАНИЯ И НЕДОСТАТКИ

Недостатков в содержании и оформлении диссертации, которые могли бы отрицательно повлиять на изложение и понимание ее основных научных и практических результатов, не выявлено.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тема выполненной диссертации актуальна и востребована. Подход автора к решаемой задаче прагматичен, последователен и систематичен. Им пройден и представлен весь цикл разработки уникальной технологической системы ЭЛ от физического обоснования и разработки ее технических контуров до экспериментов на пучке и вводу в эксплуатацию на действовавшей мега-установке Tevatron (FNAL, США). Выводы и рекомендации работы хорошо обоснованы и подтверждены на практике.

Диссертация является целостным, обладающим внутренним единством научно-исследовательским трудом по физике пучков заряженных частиц и ускорителей. В ней детально представлен такой ее современный раздел как физика и техника (больших) адронных накопителей со встречными сталкивающимися пучками. Решена важная научно-техническая проблема по созданию и внедрению системы ЭЛ как средства для воздействия на длительно циркулирующий пучок адронов путем введения источника локализованной аксиально-симметричной поперечной электромагнитной силы с регулируемым поперечным профилем (вплоть до полых трубчатых распределений), синхронизованной с продольной (временной) структурой циркулирующего пучка и учитывающей возможные различия подмножеств соседних сгустков.

Результаты и положения, выносимые на защиту, обладают заметной новизной. Она обусловлена не только уникальностью объекта внедрения, но

и спецификой тонких эффектов динамики пучка, критичных для современных адронных накопителей со встречными сталкивающимися пучками, с которыми имеет дело диссертация. Многие из ее результатов прошли экспериментальную проверку при разработке, создании и вводе в эксплуатацию технологической системы электронных линз в уникальной научной установке — коллайдере Tevatron (FNAL, США).

Диссертация представляет научный и практический интерес. Ее результаты могут быть рекомендованы к использованию в научных центрах и исследовательских институтах, занятых эксплуатацией и разработкой резонансных кольцевых накопителей протонов, антипротонов, ионов. В их число входят ОИЯИ (Дубна, Россия), CERN (Женева, Швейцария), BNL (Брукхевен, США), FNAL (Батавия, США), FAIR/GSI (Дармштадт, Германия), проекты категории FCC (Западная Европа), SpRC (Китай).

Основное содержание диссертации полностью соответствует ее автореферату.

Научные результаты диссертации опубликованы ее автором в научно-технической литературе (более 80 печатных работ, из них 14 — в рецензируемых научных изданиях).

Работа прошла достаточную многолетнюю (в течение 20 лет) апробацию на национальных и международных конференциях, совещаниях и семинарах по ускорительной тематике.

Прямых заимствований материалов или отдельных результатов без ссылки на их авторов или источник не обнаружено. Список использованной литературы — исчерпывающий (242 наименования).

Текст диссертации хорошо оформлен и изложен четким и ясным языком. Материал диссертации интересен и убедителен с точки зрения положительной научно-квалификационной аттестации автора.

В целом, работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степе-

ней”, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842.

Автор диссертации — **ШИЛЬЦЕВ Владимир Дмитриевич** заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент:

Иванов Сергей Владиславович,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, академик РАН,

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника,

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1,

+7(4967)71-33-66,

Sergey.Ivanov@ihep.ru

ФГБУ Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,

директор



С.В. Иванов

30 ноября 2017 г.