

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Лебедева Валерия Анатольевича на диссертацию Сандалова Евгения Сергеевича «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность избранной темы

Диссертация посвящена решению исключительно важной проблемы – подавление поперечной неустойчивости в сильноточном электронном индукционном ускорителе, разработанном в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). Индукционные ускорители находят применение в широкой области исследований и технологий, и получение максимально возможного тока пучка является исключительно важной задачей, решение которой невозможно без понимания механизмов развития неустойчивости и нахождения методов ее подавления.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Рассмотренные механизмы развития неустойчивости и выводы находятся в согласии с ранее проведенными исследованиями и подтверждены в экспериментах, проведенных в ИЯФ СО РАН. Результаты компьютерного моделирования хорошо совпадают с экспериментом. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, хорошо обоснованы.

Новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций

Запуск каждого большого ускорителя и выход на проектные параметры всегда является непростой задачей, отличающейся новизной и значимостью. В данном случае можно выделить следующие основные результаты, представленные в диссертации:

- Разработка программного комплекса, необходимого для проведения расчетов поведения пучка в ускорителе, которая также включает расчеты развития поперечной неустойчивости;
- Компьютерное моделирование ускорения и развития неустойчивости, которое позволило найти проблемные места в ускоряющей структуре и предложить методы подавления неустойчивости;
- Предложение на установку экранирующих электродов, уменьшающих взаимодействие пучка с ускорителем, и оптимизация их положения;
- Предложение на установку и нахождение оптимальных мест для установки поглотителей, уменьшающих добротность опасных электромагнитных мод.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Результаты, представленные в диссертации, позволили достичь рекордных токов и яркости ускоренного пучка. Это достижение отрывает широкие возможности для различных приложений. В частности, такие пучки могут быть применены для генерации электромагнитной радиации при помощи лазера на свободных электронах и для использования в электронном охлаждении, основанном на циркуляции охлаждающего электронного пучка в накопителе, для которого стабилизация положения пучка на выходе индукционного ускорителя является исключительно важным требованием.

На защиту автором выносятся следующие вопросы

1. Расчет величины добротности и коэффициента связи с пучком собственных дипольных мод ускоряющей структуры, которые наиболее опасны в отношении развития поперечной неустойчивости пучка.

2. Методика измерений электродинамических свойств ускорительного модуля ЛИУ на основе дипольного излучателя, реализованная на экспериментальном стенде, обеспечивает регистрацию наиболее неустойчивых дипольных мод с добротностью $Q \geq 10$.

3. Применение поглотителей колебаний электромагнитного поля существенно для снижения добротности опасных дипольных мод ускорительного модуля ЛИУ. Результаты вычислений подтверждены как в «холодных» (без пучка), так и в «горячих» (с пучком) экспериментах.

4. Программный комплекс для моделирования динамики поперечной неустойчивости, основанный на разложении возбуждаемых пучком колебаний по собственным модам ускорительных модулей.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении автор дает детальный обзор развития теоретических и экспериментальных исследований в области индукционных ускорителей. Одним из первых ускорителей такого типа стал американский ЛИУ Astron, созданный под руководством Н.К. Христофилоса в Ливерморской национальной лаборатории (LLNL), построенный в 1963 г. В этом ускорителе был получен электронный пучок длительностью 300 нс, током 350 А и энергией 3.6 – 3.8 МэВ, но проектный ток в 1 кА не был достигнут из-за развития поперечной неустойчивости пучка. Эти же проблемы были встречены в ИЯФ СО РАН в процессе отладки первой очереди ЛИУ с энергией до 5 МэВ.

В первой главе рассмотрена общая схема комплекса ЛИУ. Затем изложены теоретические основы и оценки инкремента поперечной неустойчивости пучка, а также представлено описание разработанного программного комплекса для исследования механизма возбуждения поперечной неустойчивости ультрарелятивистского электронного пучка в комплексе ЛИУ. В заключение приведены расчеты характеристик дипольных мод электродинамической системы ускорительного модуля.

Во второй главе приведено описание экспериментального стенда и методики измерений электродинамических свойств ускорительных модулей комплекса ЛИУ, которые включают обзор методик, применяемых для измерений спектра собственных колебаний, описание измерительного стенда и методики проведения эксперимента, а также результаты «холодных» измерений свойств ускорительного модуля и сравнение с результатами вычислений.

Третья глава посвящена исследованиям предлагаемых методов подавления поперечной неустойчивости, применимых к комплексу ЛИУ. Рассмотрен эффект установки поглотителей на электродинамические характеристики ускорительного модуля. Приведены результаты «холодных» измерений электродинамических свойств ускорительного модуля с поглотителем в виде межиндукторных вставок и расчеты требуемых изменений геометрии модулей ЛИУ для разведения наиболее опасных мод по различным частотным интервалам.

В четвертой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований инкрементов поперечной неустойчивости в ЛИУ. В частности, рассмотрено моделирование развития поперечной неустойчивости ультрарелятивистского электронного пучка и сравнение с экспериментальными данными, результаты моделирования ЛИУ с энергией 5 и 10 МэВ, а также методика измерений инкремента поперечной неустойчивости и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

В пятой главе представлена предлагаемая схема ЛСЭ на основе пучка ЛИУ для генерации когерентных импульсов ТГц-излучения, а также приведены оценки на требования к характеристикам

пучка.

В заключении приводятся результаты выполненного исследования и перспективы дальнейшей разработки темы.

Замечания и недостатки

Уравнение (1.1) плохо логически связано с остальным текстом диссертации.

Уравнение в конце страницы 26, которое связывает параметр k и поперечный импеданс, имеет неправильную размерность. Размерность поперечного импеданса в системе СГС, использованной в формуле: c/m^2 .

В уравнении (1.9) опущена фаза (время) колебаний, т.е. оно не учитывает пролетный фактор.

Фраза на странице 31 «в большинстве зарубежных работ» выглядит не уместной. У нас одна физика для всех – у нас нет зарубежной физики.

Страница 32: Не понятно, что автор хотел сказать в следующем предложении: «Специальный подбор системы линз для фокусировки пучка в ускорительных модулях на ось системы в области ускоряющих промежутков для уменьшения связи колебаний с пучком».

Страница 53: Хотя в следующей фразе «часто встречающихся в применении способа измерения спектров собственных колебаний ускорительных модулей:» автор говорит об измерении спектра, в действительности обсуждается измерение структуры мод.

Страница 54: Насколько я понимаю фраза «С помощью этого метода регистрируют действительную часть поперечного импеданса» не аккуратна. Отклики, соответствующие действительной и мнимой частям импеданса, сдвинуты на 90° , что, при необходимости, не трудно увидеть в данных, набранных в измерениях.

Страница 58: В уравнении (2.2) $S(\omega)$ формально является комплексной величиной, но определена как действительная.

Некоторые частоты в холодном эксперименте не совпадают в таблицах 2.1 и 2.2, хотя очевидно относятся к одной и той же моде.

Таблица 2.2: Величину, представленную в последнем столбце, некорректно называть добротностью.

Опечатка в конце страницы 64: «в работе автора» -> «в работах автора».

Рисунок 3.3: В тексте нет объяснения почему k для моды 635 МГц сильно увеличился после введения поглотителя.

Страница 71: Фраза «Тем не менее, главный результат проведенных исследований заключается в существенном уменьшении добротностей и коэффициентов связи с пучком всех наиболее опасных дипольных мод ускорительного модуля при размещении в нем поглотителей». Насколько я понимаю, в первом приближении поглотитель не влияет на коэффициенты связи с пучком. Эта фраза также противоречит результатам, представленным на рисунке 3.3 (см. замечание выше, в предыдущем абзаце).

Страница 83: «В результате этой изолированности в расчетах наблюдается преимущественное усиление от модуля к модулю только отдельных мод, обладающих самыми высокими коэффициентами связи с пучком». Не аккуратное высказывание, вместо k должно быть использовано: $Q \cdot k$.

В заключение я хотел бы подчеркнуть следующее. Я не поддерживаю утверждение, сделанное в конце страницы 10: «Крайне важно отметить, что на данный момент не существует общей теории поперечной неустойчивости, и характер ее развития существенным образом определяется набором индивидуальных особенностей каждого ЛИУ». Я думаю, что с точки зрения ускорительного теоретика вопросов там нет и каких-то серьезных вложений в теорию я бы не ожидал. Хотя в диссертации и используется линейность уравнений электродинамики, и движение пучка рассмотрено в линейном приближении, это не артикулируется в тексте, и, по большому счету, не используется в

диссертации. Линейность подразумевает, что произвольное возмущение как от времени (зависимость от изменений тока пучка), так и от координат (перемещение линз и ускоряющих модулей) может быть представлено как сумма базовых возмущений. Я согласен с автором, что каждый ускоритель уникален, и движение пучка определяется большим числом параметров и поэтому не может быть описано одним уравнением. Тем не менее из текста диссертации видно, что развитие полуаналитической модели, которая бы использовала параметры стандартной пучковой оптики и импедансы (wake potentials) поперечных мод ускоряющих модулей, не представляет большой проблемы и могло бы значительно ускорить расчеты движения пучка.

В дополнение к предыдущему мне хотелось бы добавить, что в тексте диссертации нет простых объяснений почему неустойчивость затухает (см. (1.1)), и как на это может повлиять присутствие связи между концом и началом ускорителя. Строго говоря, затухание, которое присутствует в формуле (1.1), не позволяет использовать термин неустойчивость в описании рассмотренного явления. Это даже не конвективная неустойчивость, поскольку движение пучка затухает само по себе – без всяких механизмов стабилизации. Скорее это специфический механизм усиления начальных возмущений, чем неустойчивость; и я думаю, что термин «the breakup instability», введенный более 50 лет назад, не удачен и не отражает существа проблемы.

Выводы и заключение

Диссертация Сандалова Евгения Сергеевича является научно-квалификационной работой, в которой предложены и реализованы методы подавления поперечной неустойчивости в индукционном ускорителе. Работа выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, замечания и недостатки, указанные выше, не умаляют ее достоинств. Без сомнения, работа, выполненная соискателем, полезна для развития техники и теории ускорителей заряженных частиц. Диссертация Сандалова Е.С. полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Лебедев Валерий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сандалова Евгения Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (специальность: 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника), доцент, заместитель начальника ускорительного отделения по научной работе, Лаборатория физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Адрес: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6
Тел.: +7 (980) 019-27-12, e-mail: valebedev@jinr.ru

23 августа 2023 г.



Лебедев Валерий Анатольевич

Подпись Лебедева В.А. удостоверяю
Главный ученый секретарь ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук



Неделько Сергей Николаевич