

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

**Запевалова Владимира Евгеньевича**

на диссертационную работу

**Сандалова Евгения Сергеевича**

**«Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям»,**

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертационная работа Сандалова Е.С. посвящена решению важной научной проблемы физики сильноточных линейных ускорителей – обеспечению устойчивости интенсивного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) с дискретной фокусирующей системой, созданном в Институте ядерной физики СО РАН. В отличие от абсолютного большинства сильноточных ЛИУ мирового уровня, в которых для фокусировки пучка используется непрерывное магнитное поле, в данном ускорителе для этой цели применены отдельные магнитные линзы, что существенно повышает требования к устойчивости пучка. Выявление типа доминирующей неустойчивости пучка в таком ускорителе, изучение физических процессов, характеризующих ее возбуждение и развитие, и на этой основе предложение способов ее надежного подавления – основные задачи проведенного исследования. **Актуальность** поставленных задач заключается в том, что без их эффективного решения невозможно достижение в таком ЛИУ параметров пучка, сопоставимых по величинам с ускорителями мирового уровня. Кроме того, на современном этапе развития отечественной науки, характеризуемом насущной потребностью в сильноточных источниках электронов для генерации мощных потоков ЭМ-излучения, данная работа обладает большой актуальностью и с точки зрения фундаментальной науки, поскольку предоставляет новые знания по физике неустойчивостей сильноточных электронных пучков в периодических ускоряющих структурах.

Диссертационная работа Сандалова Е.С. состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 141 страницу текста, 41 рисунок, 9 таблиц, список литературы (109 источников). Диссертационная работа имеет логичную структуру и высокий уровень научной строгости, написана простым и понятным языком, приведенные результаты доступны для восприятия и понимания.

Содержание **автореферата** соответствует содержанию диссертации.

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, отражены цель и научные задачи, доказаны научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, ясно сформулированы научные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

**В первой главе** приведено общее описание линейного индукционного ускорителя, созданного Институтом ядерной физики СО РАН, его системы формирования электронного пучка и последующей ускоряющей структуры с дискретной фокусирующей магнитной системой в виде отдельных магнитных линз. Кроме того, подробно представлены теоретические основы механизма развития поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ, приведены аналитические оценки инкремента поперечной неустойчивости, а также представлено обсуждение основных физических факторов, влияющих на динамику поперечной неустойчивости в созданном ЛИУ. Помимо этого, в главе описаны элементы программного комплекса, разработанного для более точного описания динамики развития поперечной неустойчивости пучка в таком ускорителе.

**Во второй главе** представлен краткий обзор существующих методик измерения спектра собственных электромагнитных колебаний ускорительных модулей ЛИУ. В продолжении главы автор приводит подробное описание созданного экспериментального стенда и оригинальной методики «холодных» измерений электродинамических свойств ускорительных модулей ЛИУ. Представлено сопоставление результатов этих измерений с данными, полученными из численного моделирования и экспериментов с пучком. Из этого сопоставления продемонстрировано, что частоты основных электромагнитных колебаний, зарегистрированные в «холодных» измерениях, рассчитанные в результате численного моделирования и полученные в экспериментах с электронным пучком, хорошо согласуются (с точностью до 10-15 МГц).

**В рамках третьей главы** подробно описаны теоретические и экспериментальные исследования, целью которых является решение задачи о подавлении собственных ЭМ-колебаний, возникающих в полостях ускорительных модулей ЛИУ. Для решения этой задачи автором были предложены описанные в диссертации изменения конфигурации различных элементов ускорительного модуля ЛИУ совместно с применением поглотителей ВЧ-колебаний на основе ферритосодержащих материалов. По результатам проведенного моделирования из анализа пространственной структуры ЭМ-полей основных мод ускорительных модулей ЛИУ был осуществлен выбор мест размещения поглотителей в областях преимущественной локализации этих полей с учетом обеспечения электрической прочности модуля по отношению к электрическому полю, ускоряющему электронный пучок. Это позволило разработать удобную для монтажа и экономичную конструкцию эффективных пассивных поглотителей колебаний и тем самым в последующем обеспечить устойчивую транспортировку электронного пучка на всей длине ускорительного комплекса ЛИУ.

**В четвертой главе** описаны результаты моделирования динамики поперечной неустойчивости сильнорелятивистского электронного пучка в ЛИУ с энергией пучка 5 и 10 МэВ. В данной главе автор приводит результаты исследований режимов развития поперечной неустойчивости и влияния на ее инкремент ряда параметров задачи, среди которых можно выделить: ток пучка, спектр дипольных мод, возбуждаемых пучком в ускорительных модулях, их коэффициенты связи и добротности, а также величина

магнитного поля линз. В продолжении главы автором был проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами моделирования поперечной неустойчивости при различных режимах работы ускорителя, в которых варьировались ток и энергия пучка, а также величина магнитного поля фокусирующих линз. В серии расчетов динамики поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с ускорительными модулями, снабженными ВЧ-поглотителями, продемонстрировано существенное снижение инкремента этой неустойчивости. При этом автор отмечает, что увеличение фокусирующего магнитного поля в линзах и уменьшение тока пучка приводят к снижению инкремента, что качественно согласуется с теорией поперечной неустойчивости, описанной Нилом, Купером и Холлом.

Следует отметить также, что разработанный автором программный комплекс для описания динамики поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ позволяет рассчитывать значение инкремента усиления колебаний центроида пучка от модуля к модулю, которое лежит в пределах ошибки измерения этой величины в эксперименте ( $\sim 20\%$ ).

**В пятой главе** рассмотрена возможность применения электронного пучка ЛИУ в качестве драйвера для ЛСЭ-генератора ТГц диапазона, предложенного и создаваемого в ИЯФ СО РАН совместно с ИПФ РАН. В тексте главы приведены оценки на требования к разбросу продольных скоростей электронов пучка для обеспечения максимального электронного КПД генерации излучения. В результате показано, что достигнутые в экспериментах параметры пучка ЛИУ позволяют использовать его в качестве эффективного драйвера ЛСЭ для генерации мощных импульсов когерентного излучения субгигаваттной мощности в диапазоне частот 0.3-1.2 ТГц.

**В заключении** диссертационной работы представлены основные выводы и результаты исследований, среди которых наиболее важные корректно отражены в положениях, выносимых на защиту:

1. Созданы модели для расчета основных характеристик собственных дипольных ЭМ-колебаний ускорительных модулей ЛИУ, определяющих развитие поперечной неустойчивости электронного пучка. С их помощью удалось идентифицировать более двухсот таких мод в интервале частот 0.3–1.1 ТГц, определить их добротности и коэффициенты связи с пучком, выделить из них наиболее опасные с точки зрения развития поперечной неустойчивости пучка.

2. Созданный программный комплекс, основанный на разложении возбуждаемых пучком ЭМ-колебаний по собственным модам ускорительных модулей, позволяет корректно моделировать динамику поперечной неустойчивости электронного пучка, при этом расчетное значение инкремента неустойчивости находится в пределах ошибки измерения этой величины ( $\sim 20\%$ ) в эксперименте.

3. В численном моделировании и экспериментах с пучком продемонстрирована эффективность применения ВЧ-поглотителей энергии дипольных ЭМ-колебаний в ускорительных модулях для существенного снижения их добротностей до значений  $Q = 10 - 15$ .

4. Предложены методы подавления дипольных ЭМ-колебаний ускорительных модулей, позволившие в итоге уменьшить амплитуду поперечных колебаний центроида килоамперного пучка с энергией до 10 МэВ на выходе ЛИУ до значений менее 2 мм, что является одним из основных требований для его использования в перспективном ЛСЭ-генераторе терагерцового диапазона частот.

**Научная новизна диссертационной работы** не вызывает сомнений, поскольку диссертация содержит важные научные результаты, полученные впервые: было проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной фокусирующей магнитной системой. С помощью численного моделирования и анализа экспериментальных данных впервые были проведены исследования зависимостей инкремента поперечной неустойчивости пучка в созданном ЛИУ с дискретной фокусирующей магнитной системой от параметров пучка, электродинамических свойств модуля и внешних фокусирующих магнитных полей. На основе проведенного исследования была продемонстрирована эффективность применяемых методов подавления этой неустойчивости пучка в ЛИУ.

**Научная и практическая значимость** полученных результатов также не вызывает сомнений, поскольку обеспечение устойчивой транспортировки электронного пучка в ЛИУ с килоамперным уровнем тока и энергией до 10 МэВ позволяет сохранить высокую яркость пучка до выхода его из ускорителя и тем самым открывает возможность его применения для целого ряда приложений, в том числе и для создания эффективного лазера на свободных электронах терагерцового диапазона.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования** подтверждается систематическим характером исследований, сопоставлением и хорошим согласием результатов экспериментов (и «холодных», и с электронным пучком) с результатами теоретического анализа и численного моделирования, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств, используемых в настоящее время.

Содержание диссертационной работы Сандалова Евгения Сергеевича «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям» соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника (пункты 1, 3, 8 раздела «Направления исследований»). Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу с высоким научным уровнем. Результаты, полученные в диссертационной работе (методы подавления колебаний пучка), несомненно, будут использованы при разработке подобных ускорительных комплексов. Разработанная модель для расчета поперечной неустойчивости электронного пучка позволит изучать и предсказывать ее динамику и в других ускорителях электронов. Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 научных статьях и представлялись на 4 международных и 2 российских конференциях в виде докладов. Исследования по теме диссертационной работы поддержаны грантами РНФ и РФФИ.

#### **Замечания и вопросы по диссертационной работе**

Следует отметить, что в плане новизны, глубины анализа и раскрытия материала диссертация Е.С. Сандалова находится на достаточно высоком уровне, что характерно для работ, выполняемых в ИЯФ СО РАН. В работе реализован целый ряд оригинальных научно-технических решений, которые могут иметь перспективы дальнейшего развития. Тем не менее, по содержанию работы можно сделать ряд замечаний:

- 1) В диссертации не приведено обоснование выбора математической модели программного комплекса для расчета динамики поперечной неустойчивости пучка

в ЛИУ, основанной именно на разложении возбуждаемых пучком ЭМ-колебаний по собственным модам ускорительных модулей, в сравнении с другими существующими в настоящее время, в том числе зарубежными программными комплексами.

- 2) В работе автора отсутствует оценка влияния на транспортировку пучка других возможных типов неустойчивостей электронного пучка в ЛИУ в сравнении со вкладом поперечной неустойчивости.
- 3) На стр. 12 опечатка с повторением слов в предложении «была экспериментально продемонстрирована устойчивая транспортировка пучка на всей протяженности во всей протяженности вакуумного канала ускорителя».
- 4) В диссертационной работе отсутствует хотя бы краткое описание диагностического комплекса для измерения характеристик электронного пучка, который далее используется в исследовании поперечной неустойчивости.
- 5) На стр. 32 автор приводит описание программного комплекса для расчета поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, основанного на разложении полей пучка в ускорительных модулях только на дипольные моды. Желательно указать почему моды других порядков не влияют на характеристики электронного пучка и его динамику.
- 6) На стр. 50 в системе уравнений движения частиц пучка присутствуют потенциальные электрические поля, создаваемые объемным зарядом электронов пучка, однако далее влияние пространственного заряда на инкремент поперечной неустойчивости нигде подробно не описано.
- 7) В главе 2 неудачно использован термин «холодные эксперименты», поскольку это является жаргонизмом, и, аналогично, неудачно использование выражения «могильник» для коллектора электронного пучка.
- 8) В главе 4 не представлены к обсуждению результаты исследований влияния параметров импульса тока пучка, формируемого инжектором ЛИУ, на инкремент поперечной неустойчивости, а также амплитуду колебаний центроида пучка, хотя, казалось бы, это требовалось сделать.
- 9) В главе 5 приведены оценки характеристик электронного пучка для его применения в схеме ЛСЭ на базе брэгговских отражателей и резонаторов Тальбо типа, однако в названии диссертации упоминается о «приложениях» пучка во множественном числе, что не было раскрыто в тексте диссертации.

Сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость и общую хорошую оценку диссертационной работы Е.С. Сандалова.

#### **Выводы и заключение:**

В заключение следует отметить, что диссертационная работа Сандалова Евгения Сергеевича «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям» представляет собой решение актуальной научной проблемы, имеющей важное практическое значение для создания высокоэффективной отечественной ускорительной техники. Выводы и заключения по результатам проведенных исследований обоснованы. Диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов 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, Запевалов Владимир Евгеньевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сандалова Евгения Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

Заведующий лабораторией  
«Лаборатория гиротронов для  
термоядерных исследований»,

д.ф.-м.н. по специальности  
01.04.04 – Физическая  
электроника, доцент

Запевалов

Владимир

Евгеньевич

Дата

04.09.2023

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46

Тел.: +7 (831) 416-48-17

E-mail: zapev@ipfran.ru

Подпись заведующего лабораторией Запевалова Владимира Евгеньевича

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ИПФ РАН

И.В. Корюкин

