

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Кремнева Николая Сергеевича

на тему: «**Конструкция системы электронного охлаждения коллайдера NICA**»

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность избранной темы

Создание новых современных коллайдеров на встречных ионных пучках с повышенными требованиями к качеству пучков частиц является одним из ключевых факторов развития экспериментальных исследований в области ядерной физики. В российском проекте коллайдера на встречных ионных пучках NICA для снижения энергии хаотического движения ионов используется метод электронного охлаждения, предложенный Г.И. Будкером в 1966 г. Для получения заявленных проектных параметров по энергии столкновения тяжелых и поляризованных ионов, проектной светимости система электронного охлаждения (СЭО) коллайдера должна обеспечивать энергию пучка охлаждающих электронов диаметром (5-20) мм до 2,5 МэВ при токе до 1 А на длине двухканального соленоида охлаждения около 6 м. Создание современных конструктивных решений отдельных секций, узлов двухканальной системы электронного охлаждения, обеспечивающей степень неоднородности продольного магнитного поля ($\Delta B_{\perp} / B$) менее 10^{-5} при заданных габаритных, электрических и других удельных параметрах является комплексной научно-технической задачей. Формирование подходов к конструированию таких систем является важным этапом развития ускорительной техники для решения актуальных задач физики высоких энергий.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, трех справочных приложений. Полный объем диссертации – 169 страниц, включая 98 рисунков, 40 таблиц и библиографический список из 84 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность темы, представлены разделы - степень разработанности темы, цели и задачи, степень достоверности и апробации результатов, структура и объем диссертации, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, кратко описана методология и методы работы, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена рассмотрению результатов конструирования, прототипирования, создания и оптимизации ключевого звена системы СЭО ускорительного комплекса NICA. Во вводной части главы приведены состав и краткое общее описание основных систем, входящих в СЭО. Разделы главы посвящены последовательному описанию конструкции основных обмоток, обеспечивающих продольное магнитное поле на длине двухканального соленоида охлаждения коллайдера; механизма юстировки обмоток ведущего магнитного поля; сборки обмоток корректирующих поперечных магнитных полей; корпуса (экранирующего магнитопровода) соленоида охлаждения; прототипа корпуса основной секции; секции соленоида охлаждения; подставок секций соленоида и гирдера.

Вторая глава описывает элементы, обеспечивающие ввод-вывод ионного пучка. После представления заданного характера изменения продольного магнитного поля при изменении поля с 2 до 1 кГс последовательно описываются дипольный корректор ионного пучка, тороид и согласующая секция 1-2 кГс.

Третья глава посвящена рассмотрению особенностей элементов, обеспечивающих двухканальную транспортировку электронных пучков от высоковольтной (2,5 МВ) колонны ускорителя электронов до соленоида охлаждения коллайдера и последующую транспортировку до канала рекуперации энергии электронного пучка в этом ускорителе. Представлена схема расположения элементов магнитной системы и её общее описание. Детально описывается поворотный соленоид, особенности прямолинейных соленоидов, соленоидов с отсекающим шиббером, согласующей секции 0,5-1 кГс, вставки транспортного канала.

В **четвертой главе** представлено описание устройства высоковольтной части, обеспечивающей генерацию, ускорение электронного пучка до энергии 2,5 МэВ, а также замедление и поглощение выполнившего свою функцию электронного пучка.

Пятая глава «Система измерений и коррекции электронного пучка» описывает аспекты, касающиеся конструкции и расположения датчиков положения электронного пучка, а также коррекции формы и положения пучка. Приведены схемы расположения корректоров положения и формы пучка и дипольных корректоров ларморовского вращения пучка. В разделах главы поясняются особенности датчиков положения электронного и ионного пучков и дипольных корректоров ларморовского вращения.

Шестая глава описывает вакуумную систему СЭО. Представлен общий вид вакуумной системы и описание трех основных участков – соленоида охлаждения с вакуумными камерами тороидов и транспортного канала до соленоидов LINE08-1, LINE08-2, участка от ускорительных трубок пушек до соленоидов LINE08-1, участка от соленоида LINE08-2 до коллектора.

В **Заключении** приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы (84 наименования) содержит полноценную библиографию по представленной тематике диссертации.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы подтверждается полным циклом проведенных работ, включающих расчет, моделирование, изготовление, оптимизацию, экспериментальную проверку параметров и характеристик созданных конструкций элементов и узлов, входящих в состав системы электронного охлаждения коллайдера ускорительного комплекса NICA.

Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна полученных результатов заключается в том, что впервые рассчитана, сконструирована, изготовлена, оптимизирована и проверена на соответствие требованиям уникальная по совокупности параметров двухканальная система электронного охлаждения коллайдера NICA, обеспечивающая охлаждение в параллельных каналах с межосевым расстоянием 320 мм конструктивно одного соленоида ионных пучков с энергиями до 4,5 ГэВ/нуклон при общем энергопотреблении СЭО до 700 кВт. Новизна рекомендаций

закljučается в предложенных конструктивных и компоновочных решениях секций двухканального соленоида и отдельных узлов различных элементов магнитной, вакуумной систем СЭО, системы регистрации и коррекции положения пучка.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

1. В работе приведены подходы для предварительного аналитического расчета и численного моделирования секций элементов магнитной системы СЭО коллайдера ускорительного комплекса NICA.
2. Практическая ценность заключается в создании и апробации полного цикла разработки, создания, оптимизации, сборки и выставки магнитной системы, вакуумной СЭО коллайдера ускорительного комплекса NICA, что подтверждается успешно завершенным циклом указанных работ. Кроме того, определены подходы для совместного проектирования коллективом специалистов в САД-системах подобных сложных устройств, включающих в свой состав большое, до нескольких сотен тысяч, число элементов, что несомненно будет востребованным при создании подобных объектов.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Диссертация представляется завершенным научным исследованием, содержащим решение задачи разработки, создания, проверки и оптимизации ключевых систем системы электронного охлаждения (СЭО) ускорительного комплекса NICA, включая магнитную систему, вакуумную систему, а также сборки этих систем в технологических помещениях ускорительного комплекса NICA. Содержание диссертации полностью соответствует пункту 2 паспорта специальности 1.3.18. – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Результаты диссертационной работы опубликованы в 3-х печатных работах, из них 2 статьи опубликованы в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК РФ. Также получен патент РФ «Соленоид охлаждения». Исходя из списка публикаций можно сделать вывод о достаточном уровне освещения полученных научных результатов в печати. Опубликованные работы соответствуют тематике и основным положениям диссертационной работы.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Содержание работы выстроено логично, результаты по разработке конструкции, сборке, испытаниям и оптимизации секций и узлов системы электронного охлаждения коллайдера NICA детально описаны. Текст хорошо иллюстрирован рисунками, схемами, таблицами. Качество оформления диссертации и автореферата соответствует предъявляемым требованиям.

Замечания по диссертационной работе:

1. В разделе «Цели и задачи» автором не приведены в явном виде цель и задачи работы. И только из последующих разделов диссертационной работы становится ясно, что цель диссертационной работы заключалась в разработке, создании, проверке и оптимизации ключевых систем системы электронного охлаждения (СЭО) ускорительного комплекса NICA, включая магнитную систему, вакуумную систему и ряд других, а также разработке и апробации порядка сборки этих систем в технологических помещениях ускорительного комплекса NICA. Перечень основных задач, решаемых диссертантом, включал

обоснование, разработку, изготовление и оптимизацию конструкции внутренней секции соленоида охлаждения и его ключевых узлов, а также решение этих вопросов или доработку конструкторских решений в отношении узлов ввода-вывода ионного пучка, поворотных и прямых секций магнитной системы, системы измерений и коррекции электронного пучка, вакуумной системы.

2. Ни одна из шести глав диссертации не имеет обобщающих выводов об особенностях, удачности, недостатках, адекватности конструкторских решений или других аспектах описанной части диссертационной работы. Пояснения, приводимые внутри глав, в ряде случаев не дают возможности в полной мере определить степень значимости описанных результатов и обобщающих выводов об их использовании в других проектах и областях.

3. Для ряда описываемых элементов не приведены результаты численного моделирования магнитных полей, которые послужили основой для составления технического задания на разработку или внесение изменений в конструкции узлов, а также оценки достигнутого результата. Так, для согласующей секции 0,5 – 1 кГц (раздел 3.4) был использован ряд конструктивных улучшений для получения новых значений физических параметров, и результаты численного моделирования магнитных полей секции с дополнительной обмоткой, если бы они были приведены, наиболее наглядно пояснили бы достижение требуемых характеристик. Кроме того, не приведены результаты численного моделирования магнитных полей для дипольного корректора положения ионного пучка, согласующей секции 1-2 кГц.

4. На стр. 138 диссертации указано, что «Для предотвращения задиранья изоляционного материала камера помещается в кожух... Центровка кожуха относительно вакуумной камеры обеспечивается за счет направляющих колец, изготовленных из фторопласта». Чуть выше по тексту (стр. 134) указано, что «Увеличение скорости десорбции газов с поверхности камер обеспечивается за счет их прогрева до температур в 250..300 °С». Учитывая, что рабочая температура для марки Фторопласт-4 составляет +260 °С, выбор данного материала кажется не оптимальным.

5. Для изготовления корпуса (магнитопровода) секции соленоида охлаждения выбрана «качественная конструкционная сталь 20», тогда как для изготовления магнитопровода дипольного корректора ионного пучка использовалась «качественная конструкционная сталь 10». Из текста диссертации не ясно, почему используются разные марки стали? С целью максимального уменьшения номенклатуры материалов, нет ли возможности использовать одну и ту же марку стали для изготовления этих магнитопроводов?

6. В диссертации последовательно с, заслуживающей внимания, технической детализацией разъясняются ключевые особенности процесса и результатов разработки, однако в тексте диссертация есть некоторые стилистические, грамматические недочеты и опiski. К примеру, к таким недостаткам можно отнести следующие:

- на странице 26 в выражении (15) вместо цифры 51,43 стоит цифра 48,22;
- на странице 43 при описании вида сборки обмоток коррекции использовано слово «вычурный». Традиционное значение этого слова – «неуместное использование». Поскольку особенности разработанной конструкции сборки полностью оправданы, использование слова «сложный» или «замысловатый» было бы более оправдано;
- на странице 51, 74, 87, 120 для описания или указания величины длины использовано слово «длинной»;
- в таблице 13 Параметр «Рассеиваемая мощность» должна быть не в «Вт», а в «кВт».

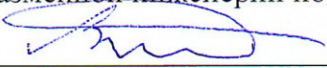
Указанные замечания не затрагивают сущности научных положений, выносимых на защиту, не снижают научной и практической ценности работы и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Н.С. Кремнева является научно-квалификационной работой, в которой решена проблема, имеющая важное значение для развития соответствующих разделов физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники, ключевых элементов и узлов систем электронного охлаждения коллайдеров пучков тяжелых заряженных частиц.

Диссертация Н.С. Кремнева соответствует всем требованиям ВАК и требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Н.С. Кремнев заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент,

заведующий лабораторией пучково-плазменной инженерии поверхности ИСЭ СО РАН,
доктор технических наук  Денисов В.В.

Денисов Владимир Викторович, доктор технических наук, заведующий лабораторией пучково-плазменной инженерии поверхности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

634055, г. Томск, пр. Академический 2/3

Телефон: 8-(3822)-900321 (доп. 6000),

адрес электронной почты: volodyadenisov@yandex.ru

Подпись В.В. Денисова удостоверяю:

Врио зам. директора по АВ ИСЭ СО РАН,
д.ф.-м.н.





И.В. Пегель

« 06 » « октября » 2026 г.