

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Кремнева Николая Сергеевича

«КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность темы исследования

Ускорительные комплексы с встречными пучками высоких энергий (коллайдеры) – являются наиболее перспективными инструментами для изучения фундаментальных свойств материи. Эффективность работы такой установки требует получения пучков высокой плотности, малого поперечного сечения, низкой поперечной температуры, что определяет число столкновений, летящих навстречу друг другу частиц встречных пучков. Для тяжелых частиц и ионов повышение числа столкновений требует разработки методов уменьшения амплитуд бетатронных и синхротронных колебаний. Одним из самых перспективных методов является предложенный Г. И. Будкером в 1966 г. и в дальнейшем развиваемый в ИЯФ СО РАН метод демпфирования колебаний тяжелых частиц в накопителях, за счет кулоновского взаимодействия между ними и сопутствующим “холодным” пучком электронов – так называемый метод электронного охлаждения. Развитие данного метода на сегодня является исключительно важным направлением улучшения параметров, создаваемых коллайдеров.

Структура и содержание работы

Работа является законченным научным трудом и состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 169 страниц.

Введение содержит описание актуальности использования систем электронного охлаждения на современных коллайдерах тяжелых частиц, перечислены решенные в ходе работы задачи, сформулирована практическая значимость полученных результатов, их новизна и формулируются выносимые на защиту положения. Приводятся общие сведения о системе электронного охлаждения (СЭО) коллайдера NICA.

Первая глава диссертации посвящена солениду СЭО и включает в себя несколько разделов. С инженерной точки зрения это место организации таких систем установки, как: магнитной, корректирующей, вакуумной, прогрева, диагностики пучка, питания,

жидкостного охлаждения и защиты. Именно на этом участке протекает физический процесс электронного охлаждения.

В первом разделе приводятся сведения о конструкции основных обмоток соленоида, способе их намотки, приводится схема намотки и способы достижения необходимой точности базирования обмоток в изделии. Во втором разделе описаны новый механизм юстировки и конструкция опоры (с пружинным узлом), необходимые для установки обмоток продольного поля в корпусе соленоида охлаждения. В третьем разделе разбирается конструкция и представлены характеристики сборок обмоток коррекции, предназначенных для обеспечения необходимой коррекции положения электронного пучка. В четвертом разделе дано описание новой конструкции корпуса секций соленоида охлаждения. В пятом разделе представлены результаты геометрических измерений прототипа корпуса секции охлаждения, обосновывающие введение улучшений в заключительную конструкцию изделия. В шестом разделе представлены принятые компоновочные решения, примененные в конструкции секций соленоида охлаждения и технические характеристики секций соленоида, сведения о составе и объеме электронных геометрических моделей секций. В седьмом разделе приводятся оригинальные решения опорных конструкций предназначенных для размещения секций соленоида, характерные для современной ускорительной техники, построенной на раздельных элементах.

Во **второй главе** дается описание мест ввода-вывода ионного пучка. На этих участках решаются задачи точного сведения двух пучков разных частиц, согласования полей транспортных соленоидов и соленоида охлаждения. Глава состоит из трех разделов. В первом разделе даны сведения о конструкции и технические характеристики дипольного корректора положения ионного пучка – магнита с О-образным сердечником, обладающего широкой областью «хорошего поля». Во втором разделе представлена конструкция тороида новой конструкции, имеющего два канала с обмотками продольного поля и дополнительные сборки обмоток поворотного поля с обмотками коррекции, размещенных на верхней и нижней стенках каждого канала. В третьем разделе дается описание согласующей секции, устанавливаемой в промежутках между тороидом и соленоидом охлаждения эта секция определяет заключительные места сборки участка охлаждения.

В **третьей главе** рассматриваются элементы, отвечающие за транспортировку электронного пучка. Их можно укрупненно поделить на пять групп: 1) поворотные соленоиды; 2) прямолинейные соленоиды; 3) вставки с отсекающими шиберами и откачкой; 4) согласующие секции. 0,5-1 кГц; 5) замыкающие вставки. Каждая группа элементов подробно рассматривается в отдельном разделе главы.

В четвертой главе представлена конструкция высоковольтной части СЭО, выполненной по модульному принципу из 42 секций. Внутри секций размещаются колонны ускорителя и рекуператора. Для получения электронного пучка используется пушка, позволяющая управлять его профилем. Пушка сопряжена с колонной электростатического ускорителя. На колонне рекуператора устанавливается коллектор с высокой эффективностью рекуперации энергии. Все части высоковольтной системы помещаются внутри бака, в котором создается избыточное давление элегаза.

В пятой главе в двух разделах представлены системы измерений и коррекции электронного пучка. Приводятся схемы расположения датчиков положения пучков, корректоров формы и положения электронного пучка, дипольных корректоров ларморовского вращения электронного пучка как целого.

В шестой главе представлены характеристики, схемы и описание вакуумной системы. Конструкции вакуумных камер выполняется с греющим элементом и тепловой изоляцией. Принципиально выделяются три вакуумных участка: 1) вакуумная система пушки (коллектора); 2) вакуумная система центральной части; 3) вакуумная система транспортного канала.

В заключении сформулированы основные результаты работы, итогом которой является оригинальная конструкция СЭО коллайдера NICA, элементы которой изготовлены и успешно испытаны в ИЯФ СО РАН.

Приложения содержат порядок сборки магнитной системы установки, фотографии основных элементов и габаритный чертеж системы электронного охлаждения коллайдера NICA

Научная новизна диссертационной работы

В качестве новизны представленной диссертационной работы следует отметить, что СЭО коллайдера NICA рассчитано на охлаждение двух ионных пучков с энергиями до 4,5 ГэВ/нуклон, при достаточно низком энергопотреблении, суммарно не превышающем 700 кВт. Это первая система, выполненная как совокупность двух независимых установок охлаждения, объединенных в двухканальное устройство.

Научная и практическая значимость полученных результатов

По результатам выполненных аналитических и численных расчетов различных элементов конструкции СЭО коллайдера NICA выработаны конструктивные и компоновочные решения элементов установки. Разработанная конструкция позволила изготовить магнитную систему для СЭО коллайдера NICA, удовлетворяющую требуемым

исходным данным. Необходимо отметить, что разработанная система СЭО коллайдера NICA является краеугольным устройством, без которого невозможно получить заявленные параметры коллайдера.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследования

Обоснованность и достоверность научных положений и результатов подтверждается тем фактом, что все составные части СЭО коллайдера NICA изготовлены и успешно испытаны в ИЯФ СО РАН.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в области исследования «Расчетно-теоретические аспекты формирования и транспортировки пучков заряженных частиц, создания ускорителей, накопителей, коллайдеров, систем охлаждения пучков тяжелых заряженных частиц» (п. 2 паспорта специальности), «Формирование и исследование магнитных и электрических полей, необходимых для ускорения и удержания пучков заряженных частиц.» (п. 4 паспорта специальности).

Апробация работы

Результаты работы, изложенные в тексте диссертации, докладывались на многочисленных российских и международных конференциях, были выполнены две публикации в рекомендованном ВАК при Минобрнауки России рецензируемом научном издании, индексируемом в международных базах данных SCOPUS и Web of Science, а также получен патент на изобретение.

Замечания по диссертационной работе

1. Главным замечанием является тот факт, что текст диссертации содержит большое количество мест, носящих следы незавершенной корректировки текста. В качестве примера первое такое место в последнем абзаце на стр.15, где есть предложение из одного слова «Секционирован». Крайнее из обнаруженных – последнее предложение на стр.122.

2. Автором в качестве иллюстративного материала часто приводятся сборочные чертежи отдельных узлов, что затрудняет понимание текста в силу того, что чертежи пришлось сжимать до формата рисунка к тексту. При этом в Приложении собраны фотографии изготовленных элементов СЭО. Представляется более рациональным либо подготовить облегченные эскизы этих узлов, либо поместить полноценные чертежи в Приложение. Фотографии лучше бы смотрелись в главах, посвященных описанию

соответствующих элементов. Особенно это касается рис. 6, 27, 30, 36, 43, 45, 47, 51, 55, 62, 69. Как пример хорошего рисунка выделил бы рис.76.

3. Подписи к рисункам не содержат легенды, позволяющие разобрать рисунок без помощи текста. При этом описание составных частей рисунка часто находится далеко от места расположения рисунка, более того, иногда пересекаясь со ссылкой на другой рисунок, что затрудняет понимание текста. Наиболее ярко это проявилось на рис.43 и 44.

4. Не понятна логика вынесения описания геометрических параметров отдельных элементов в примечания, в то время как для других аналогичное описание дается в основном тексте.

5. В разных местах диссертации указывается разное значение магнитного поля, требуемого для СЭО. На стр.26 указывается 2 кГс, а на стр.93 – 1 кГс. Хорошо бы дать пояснение, чем это вызвано.

6. В тексте есть переменные, которые не имеют пояснения, что они обозначают. Так на стр. 26 есть переменная I_{co} , значение которого дано, но что оно обозначает, непонятно.

7. В нескольких местах вводимые термины стоят позже того места, где они упоминаются в первый раз, либо вообще не расшифровываются. Так на рис. 44 используются термины COOL и MATCH. Если MATCH имеет в дальнейшем расшифровку, то COOL так и не было пояснено. На рис. 50 есть пунктирная кривая с обозначением $\Gamma^{-0.5}$ без объяснения, что такое Γ и почему в степени -0.5.

8. Представляется полезным добавить в таблицы, приводимые в тексте строку с результатом оценки предельной температуры, ожидаемой на том или ином элементе СЭО. Такой параметр критически важен при выборе той или иной конструкции и конструкционного материала. Описание нескольких узлов содержит требуемую информацию, но далеко не всех. Хорошо бы пояснить, представленные цифры – это аналитические оценки или результат численного моделирования. Кроме того, при описании вакуумной системы указывается, что она разрабатывалась под температуру 300-400°. Хорошо было бы пояснить, нагрев до указанной температуры достигается на уже собранной установке, или же в процессе подготовки вакуумной системы к сборке, и как это влияет на сопряженные элементы СЭО, в частности, на компаунд, используемый в обмотках соленоида.

Отмеченные недостатки имеют рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки работы.

Автореферат содержит основные идеи, положения и выводы диссертационной работы и в достаточной мере дает представление о диссертации в целом.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную и перспективную тему, выполненную автором на высоком научном и техническом уровне. Представленные в работе результаты исследований достоверны, выводы, заключения и рекомендации аргументированы и обоснованы. Результаты работы опубликованы и апробированы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Кремнева Николая Сергеевича «Конструкция системы электронного охлаждения коллайдера NICA» 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, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Кулевой Тимур Вячеславович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Кремнева Николая Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор технических наук (01.04.04 – Физическая электроника),
заместитель руководителя Комплекса по прикладным научным
исследованиям и экспериментальным установкам,

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Адрес: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

тел. +7 (499) 196-95-39

e-mail: kulevoy@itep.ru



Т.В. Кулевой

23 09

2026 г.

Подпись Т.В. Кулевого заверяю:
Заместитель директора
главный ученый секретарь



О.А. Алексеева