

# ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Рыбакова Ивана Викторовича

«Физическое обоснование нормально проводящего ускоряющего резонатора для интенсивного линейного ускорителя ионов водорода», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

В диссертации Рыбакова И.В. представлены результаты расчетов перспективной нормально проводящей резонансной структуры с разрезными дисками (cut disk structure, CDS) для ускорения отрицательных ионов водорода с энергией 101,7 МэВ, впервые предложенной В.В. Парамоновым. Разработка эффективных резонансных структур для линейных ускорителей протонов и ионов с большим током (10 мА и более) не теряет своей актуальности на протяжении нескольких десятков лет. Основное внимание уделено расчёту электродинамических характеристик CDS для первой секции основной части линейного ускорителя Института ядерных исследований Российской академии наук состоящей из четырёх резонаторов, основанному на трёхмерном численном моделировании.

Предложенная в диссертации структура CDS впервые была применена в составе установки PITZ (DESY) в 2010 г, когда пришла на смену структуре TESLA и обеспечила эффективное ускорение ультррелятивистских электронов. Данная структура близка к классической бипериодической ускоряющей структуре, но имеет бóльший размер окон связи. Применение нормально проводящих резонаторов для ускорения протонов и ионов в области средних энергий сменяется использованием сверхпроводящих структур. Применение сверхпроводящих структур, хотя и неотвратимо, однако требует решения известных технических проблем. Поиск и апробация нормально проводящих ускоряющих структур с высокими электродинамическими характеристиками для ускорителей протонов и ионов все ещё востребованы. В особых случаях такие структуры безальтернативны. В связи с этим, разработка нормально проводящей CDS структуры является, несомненно, актуальной.

Новизна работы заключается в том, что рассчитан вариант структуры CDS предназначенной для ускорения в ней отрицательно заряженных ионов водорода с энергией 101,7 МэВ.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием широко известным, в том числе среди разработчиков узлов и систем ускорителей заряженных час-

тиц, и подтвердившими свою точность программами трехмерного моделирования CST Studio Suite и ANSYS.

Результаты, полученные при работе над диссертацией, в особенности, разработанная и рассчитанная CDS структура, имеют несомненную практическую ценность, поскольку могут быть использованы при модернизации ускорительного комплекса ИЯИ РАН, а структура CDS предлагается в качестве замены структуры резонаторов с шайбами и диафрагмами в начале основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН, что оправдано в текущих экономических условиях.

Диссертация И.В. Рыбакова содержит введение, трёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении сформулирована постановка задачи.

В первой главе выполнено сравнение электродинамических характеристик ускоряющих структур, которые потенциально могут быть использованы в начальной части линейного ускорителя отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН. Определены смещения частот, как ускоряющего  $E_{01}$ , так и связанного видов колебаний, рассчитаны полосы запираания для структур с шайбами и диафрагмами, CDS, annular coupled structure (ACS) и side coupled structure (SCS) из-за их нагрева высокочастотными токами. Представлены результаты расчётов смещения частот ускоряющего и связанного видов колебаний, а также полосы запираания для CDS структуры с рабочей частотой 991 МГц при средней вводимой мощности 500 Вт для трёх вариантов схемы охлаждения: с помощью водяного охлаждения по внутренним каналам, внешним и одновременно по обоим. Автор заключает, что при указанных условиях достаточно ограничиться использованием только внутренних водяных каналов, причём ширина полосы запираания не превышает 400 кГц. Такая схема охлаждения не имеет паяных соединений «вода-вакуум», что важно в процессе эксплуатации структуры.

Во второй главе представлены результаты исследования влияния геометрических параметров резонатора CDS на величину шунтового сопротивления, а также оценка вероятности возникновения вторичного электронного резонансного разряда (ВЭРР) и два способа его подавления. Определено, что максимальная величина шунтового сопротивления 139 МОм, близкая к величине шунтового сопротивления 133 МОм эксплуатируемого резонатора с шайбами и диафрагмами, достигается при значениях радиусов скруглений  $r_{c1}$  и  $r_{c2}$  2 мм и 2,2 мм соответственно и угле раскрытия 30 градусов. Полное шунтовое сопротивление 133 МОм структуры CDS на частоте 991 МГц достигается при значениях  $r_{c1}$  и  $r_{c2}$  1,5 мм и 2,0 мм соответственно и угле раскрытия 25 градусов. Диаметр

поперечного сечения резонатора составляет 249,54 мм, длина 65,24 мм, диаметр пролётного отверстия трубки дрейфа 34 мм с учётом толщины стенок. Рассчитанная добротность резонатора для ускоряющего вида колебания составляет 14870, а для связанного – 3927. Добротность резонатора нагруженного на ВЧ-тракт оценена как 5175. Определены значения допуска на отклонение геометрических параметров резонатора на примере первой секции содержащей 18 периодов, которое выбрано равным 50 мкм. Для сохранения единых геометрических параметров всех ячеек CDS и упрощения настройки резонатора до пайки ВВЭР предложено подавлять за счёт изменения плоского зазора ячейки связи, как показано на рисунке 2.19. Автором приводится методика настройки ячеек CDS и измерений их частотных характеристик.

В третьей главе диссертации представлен метод настройки секции длиной 13,75 м и содержащей четыре резонатора и три мостовых устройства, основанный на многомодовом приближении. Результаты расчётов собственных частот электромагнитного поля совпадают в пределах 1 МГц с результатами, полученными путём прямого моделирования в широко известной программе трёхмерного моделирования CST studio suite. Для снижения потерь в мостовых устройствах предложено в их переходных частях использовать отрезок волновода, сечение которого по форме близко к «лестнице».

Диссертация написана ясным языком, с использованием принятой терминологии. Содержание диссертации в достаточной мере отражено в публикациях автора, результаты исследований обсуждались на нескольких конференциях. Основные положения диссертации изложены в автореферате. Автореферат диссертации соответствует её содержанию. Оформление диссертации вызывает некоторые замечания. Так, подписи к таблицам оформлены не вполне аккуратно, встречаются различные варианты написания слова таблица в тексте (таблица, табл., Табл.). Аналогичное замечание относится к оформлению рисунков. Отсутствуют отступы перед и после рисунков, и таблиц, что затрудняет чтение материала. На стр. 25 диссертации представлен рисунок 1.10 с распределением максимальных температур в структуре CDS при различных способах охлаждения, но ни в тексте, ни в подписи к самому рисунку не указано, для какого абсолютного значения введённой мощности. На стр. 39 в записи числа использована десятичная точка, вместо десятичной запятой. Там же в тексте указывается, что ширина полосы запираения «в реальности ограничивается другими эффектами», без их уточнения. На странице 40 имеется незаконченное предложение перед таблицей 2.9, которое так и сохраняет неизвестной ожидаемую величину  $\sigma_E$ . На стр. 44 в формуле (2.13) не указано, чем является переменная  $n$ , вероятно это порядок ВЭРР. На стр. 49 вместо слов «недостаточной величины

КВЭ» предпочтительнее употребление «малого значения КВЭ», т.к. в варианте автора диссертации, складывается впечатление, что одна из задач состоит в возбуждении ВЭРР, а не его подавлении. Не вполне читаемым составлено первое предложение первого абзаца на стр. 53. На стр. 56 некорректно использовано словосочетание «расстояние между моментами появления». Более грамотно написать «промежуток времени» или «интервал». При знакомстве с диссертацией так и не удалось понять из представленных рисунков, чем является параметр  $h$  на рисунке 2.23 стр. 58. На этой же странице, очередное некорректное употребление словосочетаний «зависимость коэффициента влияния длины кольца на частоту». Данную фразу можно было составить так: «В связи с нелинейной зависимостью частоты ускоряющей моды от длины настроенного кольца...». Также, на стр. 58, имеется опечатка в слове «должно». В тексте диссертации употреблено сочетание «полу ячейка», вместо «полуячейка». На стр. 68 в формуле (3.14) отсутствует знак препинания «;». Также встречается словосочетание «напряжение ускоряющего поля», вместо «напряжённость ускоряющего поля». В целом все рисунки носят иллюстративный характер и не дают полного представления о геометрических особенностях структуры.

По содержанию диссертации имеются некоторые замечания:

1. В первой главе основной упор сделан на сравнение CDS структуры со структурой УСШД, при этом сравнение со структурами ACS и SCS выполнено поверхностно. Не указан материал структур, для которого представлены значения в таблице 1.4 на стр. 21.
2. Расчёт эффективности схем охлаждения выполнен только на отвод тепла. Отсутствуют гидродинамические расчёты схем охлаждения. Остаётся открытым вопрос о значении гидродинамического сопротивления проточных каналов схем охлаждения диаметром 5 мм и будет ли достаточным данное значение диаметров каналов для протока теплоносителя со скоростью 2 м/с.
3. Из рисунков 1.9 и 2.4 не вполне ясно расположение контура внутренних каналов охлаждения.
4. Автор проводит сравнение эффективности охлаждения структуры с применением только внутренних водяных каналов, только внешних и обоих одновременно. Будет полезно ознакомиться со схемой охлаждения только с применением внутренних водяных каналов, поскольку подвод и отвод воды к ним должен быть нетрадиционным, т.е. таким, чтобы эти подводы не служили средством внешнего охлаждения.

5. Не совсем обосновано утверждение автора на стр. 24 о том, что структура CDS не уступает аналогам по величине смещения частот рабочего и связанного видов колебаний под действием теплового нагрева ВЧ токами, т.к. не указан допуск на данную величину. Кроме того, согласно данным таблицы 1.5 величина смещения частоты ускоряющего вида колебаний  $-86,19$  кГц для структуры с шайбами и диафрагмами и  $-46,80$  для CDS. Очевидно, почти двукратное отличие данной величины.
6. В выводах к первой главе, автор указывает практически единственное преимущество предложенной структуры по сравнению с другими, использованными для сравнения, и это поперечный размер. Возникает вопрос, насколько данное преимущество нивелирует трудности изготовления таких структур. На основании данного вывода делается заключение о существенном удешевлении изготовления данной структуры. Однако, на стр. 57 главы 2 автор отмечает, что для подавления ВЭРР в структуре, возможно, понадобится нанесения покрытия из золота на внутренние элементы. Кроме того, покрытие из золота может «спровоцировать» возникновение полевой эмиссии.
7. Во второй главе автор подтверждает точность расчётов вероятности возникновения ВЭРР результатами калибровочных измерений, проведённых в Цойтене. Однако в тексте диссертации приведена одна осциллограмма и один график полученные экспериментально. Утверждать о точности измерений лишь приведённым данным, без указания самой точности, является смелым шагом.
8. В работе приводятся результаты моделирования процесса ВЭРР только первого порядка, тогда как в кругу специалистов имеется устоявшееся мнение, что расчёт ВЭРР необходимо вести вплоть до его четвертого порядка включительно, особенно для короткого плоского зазора, который присутствует в предложенной структуре.
9. Отсутствует исследования влияния электромагнитного поля в окнах связи на поле в ускоряющем зазоре.
10. На стр. 63 представлен рисунок 2.26, на котором представлено сечение минимальной сборки структуры CDS содержащее лишь две ускоряющие полуячейки с «пробелом» между ними. Читателю приходится догадываться, что для измерения частот такой сборки она должна содержать ячейку связи.

Считаю, что по содержанию, объёму и качеству представленных в диссертации методик и расчётов её материал в значительной мере отвечает кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Приведённые замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не меняют общего положительного впечатления о диссертации, которая выполнена на актуальную тему и является глубоким, самостоятельным и законченным научным исследованием, удовлетворяющим требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор Рыбаков И.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ**

Кандидат физико-математических наук,  
доцент отделения лазерных и плазменных технологий  
офиса образовательных программ  
Института лазерных и плазменных технологий  
НИЯУ МИФИ

В.С. Дюбков

Контактная информация:

Дюбков Вячеслав Сергеевич  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ  
Института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, г. Москва, Каширское шоссе д. 31,  
Тел. +7 499 3242995, e-mail: vsdyubkov@mephi.ru

Подпись кандидата физико-математических наук, доцент Отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ Дюбкова Вячеслава Сергеевича заверяю:

Заместитель начальника отдела документационного обеспечения НИЯУ МИФИ  
А.А. Свинарева

30 ноября 2020 г.

ДЮБКОВ ВЯЧЕСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ

Кандидат физико-математических наук

Специальность - 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ:

1. V.S. Dyubkov et al., Research and Design of a New RFQ Injector for Modernization of the LU-20 Drift-Tube Linac // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2016, vol. 13, no. 7, P. 915–918. ISSN 1547-4771.
2. V.S. Dyubkov, Results of using the axisymmetric RF focusing by means of field spatial harmonics at 7 MeV proton linac // *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 747, no. 1, 012071.
3. V.S. Dyubkov and Ya.V. Shashkov, Results of the Use of Axisymmetric RF Focusing in Proton Linacs at Energies up to 7 MeV // *Proceedings for the seventh International Particle Accelerator Conference IPAC'16, Busan, Korea, 2016*, P. 3449 – 345.
4. V.S. Dyubkov et al., Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron-NICA // *Proceedings for the seventh International Particle Accelerator Conference IPAC'16, Busan, Korea, 2016*, P. 941 – 943. doi:10.18429/JACoW-IPAC2016-MOPOY041.
5. V.S. Dyubkov et al., Design of Linac-100 and Linac-30 for new Rare Isotope Facility project DERICA at JINR // *Proceedings for the 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018), Daejeon, Korea, 17-22 June, 2018*, P. 220– 225.