

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.119.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **24.12.2020 г. № 8/65**

О присуждении **Рыбакову Ивану Викторовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата наук.

Диссертация «Физическое обоснование нормально проводящего ускоряющего резонатора для интенсивного линейного ускорителя ионов водорода» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, принята к защите 15 октября 2020 года, протокол №5/62 диссертационным советом Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель Рыбаков Иван Викторович 1992 года рождения. В 2015 году соискатель окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». С 2015 по 2019 год соискатель обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника Лаборатории ускоряющих систем Отдела ускорительного комплекса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, Отдел ускорительного комплекса.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Парамонов Валентин Витальевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение

науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Отдел ускорительного комплекса, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Павлов Юрий Сергеевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, лаборатория радиационных технологий, заведующий.

Дюбков Вячеслав Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт лазерных и плазменных технологий, доцент.

- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва),

В своем положительном отзыве, составленном Ермаковым Андреем Николаевичем — кандидатом физико-математических наук (Отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, ведущий научный сотрудник), подписанном Шведуновым Василием Ивановичем — доктором физико-математических наук, профессором, (Отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, и.о. заведующего), и утвержденном проректором МГУ Федяниным Андреем Анатольевичем - доктором физико-математических наук, профессором РАН, указала, что работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Рыбаков Иван Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ, 2 работы опубликованы в рецензируемых изданиях из

списка ВАК [1, 2]. Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно. Наиболее важные работы представлены в начале следующего списка:

1. *Рыбаков И.В., Парамонов В.В.*, Сравнение способов подавления мультипакторного разряда в ячейках связи ускоряющей структуры CDS // Ядерная физика и инжиниринг, 2018, Т. 9, № 2, сс. 200 – 203.
2. *В.В. Парамонов, Л.В. Кравчук, И.В. Рыбаков*, Ввод ВЧ-мощности в устройство связи ускоряющего резонатора // Письма в ЭЧАЯ, 2018, Т. 15, № 7, сс. 908 – 913.
3. *I.V. Rybakov, Y.Z. Kalinin, V.N. Leontev et al.*, Comparison of accelerating structures for the first cavity of the main part of the INR linac // J. Phys.: Conf. Ser., vol. 747, 2016, p. 012073.
4. *I.V. Rybakov, A.V. Feschenko, Y.Z. Kalinin et al.*, Proposal of the accelerating structure for the first cavity of the main part of INR linac // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 216 – 218.
5. *I.V. Rybakov, I.I. Isaev*, Estimation of multipacting in CDS structure // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 288 – 290.
6. *I.V. Rybakov, V.V. Paramonov, A.K. Skassyrskaya*, Manufacturing tolerances estimation for proton linac cavities // Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 291 – 293.
7. *I.V. Rybakov, V.V. Paramonov*, The method of accelerating structure tuning and manufacturing quality control // J. Phys: Conf. Ser., vol. 941, 2017, p. 012094.

Соискатель внёс основной и определяющий вклад в подготовку работ [1, 2, 5] и непосредственный вклад в подготовку работ [3, 4, 6, 7].

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что работа представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, и полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Отмечены следующие критические замечания:

- На странице 4 в разделе введение сказано, что в ускорителях ионов водорода присутствует ограничение на максимальный импульсный ток пучка в ~ 50 мА, вызванное соображениями радиационной безопасности. При этом не указаны ограничения на частоту повторения импульсов. Радиационная безопасность зависит от величины среднего тока, которая определяется как величиной импульсного тока, так и частотой повторения импульсов.
- В пункте «Методология и методы исследования» введения указано, что проверка результатов численного моделирования проводилась с помощью их сравнения с известными аналитическими приближениями, оценками. При этом точно не указано какими известными аналитическими приближениями, кем были проведены оценки, где и при каких допусках параметров. Не приведены ссылки на использованные оценки и приближения.
- Методика оценки влияния геометрических размеров на частотные характеристики структуры и методика моделирования неоднородных связанных систем на основе многомодового приближения в работе заявлены как новые разработки. В связи с этим возникает вопрос, возможно ли официально зарегистрировать методики как интеллектуальную собственность в виде программ для ЭВМ, либо как ноу-хау?
- Если предложенный эскизный проект резонатора имеет в совокупности столько уникальных параметров, то почему он не запатентован как полезная модель?
- В пункте «Публикации» введения сказано, что две статьи автора опубликованы в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Однако эти статьи индексируются только в базе Scopus.
- 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.
- 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.

- Из рисунков 1.9 и 2.4 не вполне ясно расположение контура внутренних каналов охлаждения.
- 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.
- 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.
- 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 нанесение покрытия из золота на внутренние элементы. Кроме того, покрытие из золота может «спровоцировать» возникновение полевой эмиссии.
- 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 по приведённым данным, без указания самой точности, является смелым шагом.

- 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.

- Отсутствует исследование влияния электромагнитного поля в окнах связи на поле в ускоряющем зазоре.

- На стр. 63 представлен рисунок 2.26, на котором представлено сечение минимальной сборки структуры CDS содержащее лишь две ускоряющие полужайчки с «пробелом» между ними. Читателю приходится догадываться, что для измерения частот такой сборки она должна содержать ячейку связи.

- Необходимость замены первого резонатора основной части линейного ускорителя, как указано в диссертации, обусловлена пробоями в нем при длительности высокочастотного импульса более 170 мкс. Планируя замену резонатора, важно понимать природу наблюдающихся пробоев с тем, чтобы гарантированно избежать повторения ситуации с новым резонатором. Причиной может быть плохое состояние внутренней поверхности ускоряющей структуры, высокая напряженность электрического поля где-либо на ее поверхности, наличие микротечи, мультипакторный разряд и т.п. В диссертации отсутствует обсуждение данного вопроса.

- Есть вопрос по рисунку 1.10 (а) - распределение максимальных температур в структуре CDS при использовании только внешних каналов охлаждения. Очевидно, что наличие щелей (окон) связи на боковых стенках, препятствующих теплопередаче, должно приводить к значительной азимутальной неоднородности распределения температуры, однако на приведенном рисунке такая неоднородность не наблюдается.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией ученых по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Обоснован выбор структуры Cut Disk Structure (CDS) для разработки резонатора основной части линейного ускорителя (ЛУ) ионов водорода на энергию вплоть до 1 ГэВ. Непосредственный практический интерес представляет ее применение для замены первого резонатора основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН для обеспечения ускорения пучков высокой интенсивности. Структура CDS обладает электродинамическими характеристиками, не уступающими существующим аналогам. При этом она обладает вдвое меньшими поперечными размерами, что удешевляет производство резонатора. Предложенная соискателем схема охлаждения структуры позволяет обеспечить эффективный отвод ВЧ тепловых нагрузок и исключить наличие в секциях резонатора паяных соединений «вода-вакуум».

- Проведена оптимизация параметров структуры CDS для ее применения в первом резонаторе основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН. Найдено сочетание геометрических параметров, позволяющее унифицировать внешний радиус ячеек секций, что позволяет упростить изготовление резонатора. При этом расчетное полное сопротивление резонатора не уступает используемому в настоящее время. Предложена и реализована в виде программы на основе пакета численного моделирования ANSYS методика оценки влияния изменения геометрических размеров на частотные характеристики структуры. Преимуществом данной методики является необходимость проведения только трех численных расчетов собственных частот структуры. С помощью предложенной методики обоснованы допуски изготовления резонатора CDS для ИЯИ РАН. Эти допуски легко реализуются на современном металлообрабатывающем оборудовании с ЧПУ. Для рабочего режима резонатора основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН показано наличие вторично-электронного резонансного разряда (ВЭРР) в секциях CDS. Точность методов расчета подтверждается результатами калибровочных измерений, проведенных на действующем резонаторе CDS ускорителя DESY PITZ в Цойтене, Германия. Для подавления развития ВЭРР предложена апробированная

в мировой практике методика, в которой применяется введение знакопеременного смещения частот соседних ускоряющих ячеек. Предложена и обоснована методика настройки секций резонатора CDS до пайки и контроля ее частотных характеристик. Особенностью данной методики является то, что она позволяет настраивать знакопеременное смещение частот ускоряющих ячеек для подавления ВЭРР в секциях CDS.

- На основе ранее описанного многомодового приближения предложена методика, позволяющая рассчитывать рабочие параметры резонатора CDS как единой неоднородной связанной системы из секций и мостовых устройств. Особенностью данной методики является использование параметров компонентов системы (секций и мостовых устройств), полученных численным моделированием, что позволяет с большей точностью учитывать конструкционные их особенности. Эта методика позволяет моделировать настройку полного резонатора, например первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН, состоящего из четырех секций и трех мостовых устройств. Методика обладает достаточной точностью в сравнении с прямым численным моделированием тестовой системы. Также для снижения потерь мощности в мостовых устройствах резонатора предложена модифицированная конструкция переходной части мостового устройства.

Оценка достоверности результатов выявила:

- Оптимальность выбора средств численного моделирования, широко апробированных в мировой практике, а именно CST studio и ANSYS.
- Достоверность результатов, представленных в работе, также подтверждается сравнением результатов численного моделирования с известными аналитическими оценками и экспериментальными данными.

Личный вклад соискателя состоит в проведении численного моделирования характеристик структур, применимых в основных частях ЛУ ионов водорода, в частности ЛУ ИЯИ РАН. Соискателем обоснован выбор структуры CDS для дальнейшей разработки резонатора. Им проведена оптимизация параметров и унификация геометрических размеров ячеек секций резонатора CDS. Автор принял участие в экспериментальной проверке результатов численного

моделирования ВЭРР в действующем резонаторе CDS ускорителя DESY PITZ. На основе оптимизированных соискателем методик обоснованы выбор оптимальных допусков изготовления структуры CDS и настройка узла связи секций резонатора с мостовыми устройствами. На всех этапах работы автором диссертации внесен решающий вклад в подготовку и представление публикаций по результатам работы.

Результаты работы могут быть применены в ускорительных центрах как в Российской Федерации, так и зарубежных: ИФВЭ Курчатовский институт, ИТЭФ Курчатовский институт, CERN, KEK, SNS.

На заседании, проведенном 24 декабря 2020 года в удаленном интерактивном режиме в соответствии с Приказом Минобрнауки № 734 от 22 июня 2020 года, диссертационный совет принял решение присудить Рыбакову И.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве **23** человек, (в т.ч. участвующих в удаленном интерактивном режиме – **15**) из них **10** докторов наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **30** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **23**, против – **0**.

Председатель

диссертационного совета Д 002.119.01

доктор физ.- мат. наук, академик РАН _____ Рубаков В.А.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физ.- мат. наук _____ Демидов С.В.

24.12.2020 г.

м.п.