

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Арсентьевой Марии Васильевны

**«Разработка структуры резонаторов W-диапазона»,**

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

Диссертационная работа Арсентьевой М.В. посвящена исследованию резонансной структуры миллиметрового диапазона длин волн (W-диапазон), с помощью которой потенциально возможно достижение темпа ускорения частиц, существенно превышающего темп ускорения в ныне используемым диапазонах. **Актуальность** избранной темы определяется необходимостью повышения ускоряющих градиентов с целью сокращения размеров ускорителей, особенно если речь идет о линейных коллайдерах на высокую энергию ускоренного пучка.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Во **введении** на основании анализа литературных данных о частотной зависимости предельных значений напряженности электрического поля в ускоряющих структурах обоснована актуальность перехода в коротковолновый диапазон длин волн для достижения высокого ускоряющего градиента. Описаны степень разработанности проблемы, цели и задачи диссертационной работы. В качестве предмета исследований автором выбрана ускоряющая структура W-диапазона, состоящая из цепочки не связанных цилиндрических резонаторов, возбуждаемых релятивистскими сгустками электронов, движущимися через пролетные отверстия на оси структуры. Также во введении раскрыты научная новизна, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертационной работы приведены результаты исследования взаимодействия заряженной частицы и сгустков заряженных частиц с цилиндрическим резонатором и цепочкой независимых цилиндрических резонаторов. В основе используемого подхода лежит известная теорема, позволяющая связать напряжение, наведенное на зазоре резонатора пролетающей по оси заряженной частицей, с ее зарядом и характеристиками резонатора, определяемые его геометрией. Выведены соотношения, позволяющие рассчитать зависимость напряжения на зазоре для точечного сгустка, сгустка с гауссовым продольным распределением заряда, в зависимости от длительности сгустка, для последовательности сгустков, для различной частоты следования сгустков и различной добротности резонатора, для случая некротной частоты резонатора относительно частоты следования сгустков. С использованием программы CST выполнены расчеты высших мод резонатора, проанализировано их возбуждение сгустком заряженных частиц выполнено моделирование возбуждения рабочей моды сгустками с гауссовым распределением заряда.

В результате проведенных расчетов автором выявлены закономерности возбуждения электромагнитного поля в резонаторах – зависимость амплитуды поля от соотношения рабочей частоты резонатора и длительности сгустка, частоты следования сгустков и добротности резонатора, расстройки частоты следования сгустков и частоты рабочего колебания.

Во **второй главе** диссертационной работы выполнен анализ имеющихся в ИЯФ СО РАН ускорителей электронов – Новосибирский лазер на свободных электронах и инжекционный комплекс ВЭПП-5 - с точки зрения применения генерируемых ими пучков для возбуждения цепочки несвязанных цилиндрических резонаторов с диаметром пролетного отверстия 0,8 мм и длиной около 200 мм на частоте 86 ГГц. Автором сделан вывод, что из-за большой длительности сгустков электронов этих ускорителей амплитуда наведенного ускоряющего поля в резонаторах не превысила бы 1 кВ/см. В этой связи, проведены расчеты динамики пучка для стенда инжектора СКИФ – потенциального источника электронных сгустков для возбуждения разрабатываемой ускоряющей структуры. Расчеты динамики пучка в СВЧ пушке с термокатодом с сеточным управлением, группирующей части ускорителя и в секции ускоряющей структуры, энергия пучка на выходе которой составляет около 50 МэВ, выполнены с помощью программы ASTRA. Расчеты выполнены для заряда сгустка 300 пКл и 1 нКл, получены значения нормализованного эмиттанса, соответственно, 20 мм мрад и 29 мм мрад. Проанализировано влияние ошибок установки элементов инжектора на параметры ускоренного пучка. Выполнены расчеты прохождения пучка электронов инжектора через исследуемую ускоряющую структуру при различных способах фокусировки. Показано, что из-за большого эмиттанса пучка токопрохождение через структуру при заряде 300 пКл составит около 50%, а амплитуда наведенного ускоряющего поля не превысит 4 МВ/м.

В заключении главы автор делает вывод о принципиальной возможности проведения экспериментов по возбуждению ускоряющей структуры W-диапазона на пучке инжектора СКИФ, однако для достижения высокого ускоряющего градиента необходим пучок с меньшим эмиттансом, большим зарядом и меньшей длительностью сгустков.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена описанию конструкции, технологии изготовления, результатов измерения погрешности изготовления ячеек ускоряющей структуры W-диапазона. Автором реализована конструкция структуры, обладающая необходимой жесткостью, которую можно разместить на испытательном стенде. Измерение размеров индивидуальных резонаторов показало недостаточную точность изготовления, что не мешает исследованию возбуждения резонаторов структуры одиночным сгустком, но из-за большого разброса частот не позволит получить эффект возрастания поля при прохождении сгустка частиц.

В **заключении** диссертационной работы суммированы основные результаты.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в том, что впервые были проведены исследования ускоряющей структуры W-диапазона, состоящей из независимых цилиндрических резонаторов, включающие расчеты возбуждения ускоряющего поля сгустками заряженных частиц, прохождения сгустков через структуру, анализ применимости изготовленной структуры для планируемых экспериментов.

**Научная и практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что полученные автором соотношения для возбуждения резонаторов последовательностью сгустков частиц могут быть использованы для анализа других типов структур в широком диапазоне длин волн. Конструкция и технология изготовления ускоряющей структуры W-диапазона могут быть использованы при создании аналогичных устройств.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, результатов исследования определяется использованием известных методов исследования взаимодействия

заряженных частиц с ускоряющими структурами, совпадением результатов вычислений по аналитическим выражениям с результатами численного моделирования.

**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).

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены автором на пяти международных конференциях.

По диссертационной работе могут быть сделаны следующие **замечания**.

1. В целом, диссертационная работа хорошо оформлена, однако встречаются отдельные опечатки. Например, в пояснении формулы (1.15) указано «где  $i$  – мнимая единица», однако в самой формуле  $i$  отсутствует. На стр. 18 в выражении  $\sigma_t = 2$  не указана размерность. На стр. 24 написано « $\Delta T/T_c$  должно быть не менее 1», должно быть «не более». Стр. 27 «..минимизировать проникновение поле...», «... измеряется с меньшей от точностью...». Стр. 29 «...что является максимальным размеров...». Стр. 37 «... с одиночным пучком с зарядом...», должно быть «сгустком». Стр. 38 «... длительность пучка на входе...», должно быть «сгустка». Таблица 6, не указана размерность максимального импульсного тока катода. В названии таблицы 13 «...параметры пучков в при ошибке...». Рис. 26 – огибающая пучка при прохождении через структуру показана в диапазоне продольной координаты от 7,6 до 9 мм?
2. Конструкция ускоряющей структуры, помещенной в трубу. На внешней поверхности структуры остаются глухие, закрытые трубой пазы, откачка которых будет крайне затруднена.
3. В процессе пайки возможно изменение продольного размера отдельных резонаторов из-за слоя припоя, изменение эффективного радиуса из-за натекания припоя, изменение частоты из-за деформации стенок. Холодные измерения изготовленной ускоряющей структуры существенно бы усилили результаты работы. Малый диаметр пролетного отверстия существенно затрудняет такие измерения, но не делает их невозможными.
4. Автор не обсуждает какие-либо возможности практического применения разработанной структуры для ускорения частиц. Тот факт, что в резонаторах структуры будет возбуждаться электромагнитное поле сомнений не вызывает, и планируемые эксперименты должны это подтвердить при наличии адекватных методов контроля поля. Следовало бы обсудить возможные схемы экспериментов по ускорению частиц.
5. Для ускоряющей структуры с диаметром пролетного канала 0,8 мм продольные и поперечные кильватерные поля, порождаемые сгустками, как возбуждающих, так и ускоряемых частиц будут вести к росту продольного и поперечного эмиттанса и, тем самым, существенно ограничивать заряд сгустков. Следовало бы дать оценки роста эмиттанса в зависимости от заряда сгустка.

Сделанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы, в которой впервые проведены исследования ускоряющей структуры W-диапазона, состоящей из независимых цилиндрических резонаторов.

Диссертационная работа Арсентьевой М.В. «Разработка структуры резонаторов W-диапазона» 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, Шведунов Василий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Арсентьевой Марии Васильевны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальностям 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, профессор, главный научный сотрудник Отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,

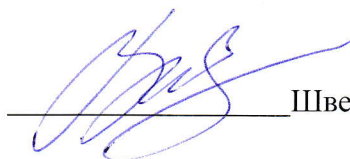
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Тел. +7 (499) 939-24-51

E-mail: shved@depni.sinp.msu.ru

10 ноября 2022 г.



Шведунов Василий Иванович

Подпись Шведунова В.И. удостоверяю  
Директор НИИЯФ МГУ, чл.-корр. РАН



Боос Эдуард Эрнстович