

**Отзыв научного руководителя на диссертационную работу  
Рыбакова Ивана Викторовича «Физическое обоснование нормально проводящего  
ускоряющего резонатора для интенсивного линейного ускорителя ионов водорода»  
на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по  
специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».**

Интенсивные Линейные Ускорители (ЛУ) ионов водорода используемые как самостоятельные установки, так и как инжекторы в интенсивные адронные комплексы, являются инструментом для исследования фундаментальных свойств материи в области физики высоких энергий. На интенсивных источниках нейтронов, основой которых являются такие ЛУ, проводится широкий круг междисциплинарных исследований, как фундаментальных, так и прикладных.

Интенсивные ЛУ на энергию порядка 1 ГэВ состоят из двух частей, различающихся типами применяемых ускоряющих структур и рабочей частотой. Основная часть, с энергии ускоряемых ионов свыше 100 МэВ, состоит из ускоряющих резонаторов. Резонатор состоит из нескольких секций периодической компенсированной ускоряющей структуры, между которыми размещаются элементы фокусировки ускоряемых частиц. В единую резонансную систему секции объединяются с помощью резонансных мостовых устройств связи. Таким образом формируется компенсированная суперструктура, в которой в секциях применяется собственно компенсированная структура, а секции с мостовыми устройствами также формируют компенсированную структуру.

Интенсивность ускоряемого пучка достигается как выбором величины импульсного тока, ограниченной эффектами пространственного заряда, так и за счет увеличения длительности ВЧ импульса. Рассеиваемая средняя ВМ мощность с величиной погонной плотности порядка 10 кВт/м приводит к существенным термомеханическим эффектам, когда деформация внутренней поверхности структуры может вызвать недопустимые отклонения ВЧ параметров. Поэтому при разработке резонаторов необходимы комплексные исследования взаимосвязанных физических процессов. Ускоряющие резонаторы интенсивных ЛУ ионов водорода являются дорогостоящими высокотехнологичными изделиями. При разработке необходимо прорабатывать вопросы настройки структуры, обеспечения долговременной надежной эксплуатации и отсутствие паразитных эффектов. Наиболее сильно взаимосвязанные эффекты проявляются в первых резонаторах основных частей при энергии  $\sim 100$  МэВ, что соответствует относительной скорости ионов  $\beta \sim 0.43$ .

Диссертационная работа И.В. Рыбакова посвящена исследованию возможности построения резонаторов для интенсивных ЛУ на основе предложенной в ИЯИ РАН перспективной ускоряющей структуры с разрезными диафрагмами (CDS) для участка энергий частиц  $\sim 100$  МэВ. Основным методом исследований в работе является численный эксперимент. Возможности современных сертифицированных программных комплексов – ANSYS, COMSOL и CST Studio позволяют исследовать в 3D приближении закономерности взаимосвязанных физических процессов.

Структура CDS успешно апробирована в ускорителе электронов установки PITZ, DESY, Zeuthen,  $\beta \sim 1$ . Предшествующие исследования показывали, что превосходя известные аналоги по комплексу параметров в области  $\beta \sim 1$ , в области  $\beta \sim 0.4$  структура проигрывает по ВЧ эффективности при введении внутренних каналов охлаждения.

В результате тщательной оптимизации размеров элементов периода CDS Рыбаковым И.В. впервые найдена конфигурация, в которой CDS не уступает аналогам по ВЧ эффективности в области  $\beta \sim 0.4$ , имея возможность размещения в ней внутренних каналов охлаждения. Для условий работы первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН,  $\beta \sim 0.43$ , им проведен сравнительный анализ параметров как известных, апробированных в интенсивных ЛУ, ускоряющих структур, так и перспективной CDS. Показано, что по комплексу параметров CDS превосходит аналоги и в области промежуточных энергий ионов,  $\beta \sim 0.43$ .

Для выработки требований к точности изготовления ячеек CDS им проведен анализ влияния погрешностей изготовления на равномерность распределения ускоряющего поля. При этом реализована программная надстройка к пакету ANSYS, позволяющая, в сочетании с известными аналитическими закономерностями, провести анализ опираясь на результаты только трех численных расчетов с ANSYS.

Развитие Вторичного Электронного Резонансного Разряда (ВЭРР) в рабочем режиме резонатора является паразитным эффектом. Возможность развития ВЭРР в ячейках связи является врожденным недостатком CDS и обусловлена топологией ячеек. Рыбаковым И.В. проведено численное исследование возможности развития ВЭРР в рабочем режиме резонаторов и проведен сравнительный анализ способов подавления. Выбран способ, заключающийся в обеспечении возбуждения в ячейках электрического поля с напряженностью, гарантировано превышающей диапазон существования ВЭРР. Это приводит к необходимости более сложной настройки секций CDS. Рыбаковым И.В. предложено, и подтверждено прямыми численными расчетами, усовершенствование методики настройки, позволяющее обеспечить необходимые результаты.

Физические размеры резонатора исключают возможность применение прямых численных методов для моделирования распределений полей в целом резонаторе. Для анализа им реализовано эффективное сочетание прямых 3D методов численного моделирования, позволяющих в высокую точность рассчитать распределения полей и другие характеристики отдельных элементов, и аналитического подхода, по результатам моделирования элементов, восстановить характеристики резонатора в целом. Сравнение результатов прямых расчетов на упрощенных моделях с результатами, полученными с применением реализованной методики, показали совпадение как в основных закономерностях, так и в численных значениях. В результате разработано предложение элемента согласования секций CDS и мостовых устройств для обеспечения необходимых параметров резонатора.

При проведении исследований Рыбаков И.В. показал достаточную теоретическую подготовку, свободное владение необходимыми средствами численного эксперимента, трудолюбие. Его вклад в проведенные исследования является основным. Он выполнил практически все расчеты, активно участвовал в обсуждении и анализе результатов и проверки их на соответствие существующим физическим моделям. Им подготовлено большинство публикаций по результатам работы, а часть их выполнены самостоятельно.

Важна и практическая ценность работы. Показано, что в случае замены первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН новый резонатор может быть выполнен на основе структуры CDS без изменений структуры и параметров подсистем и ЛУ в целом при заметном снижении затрат на изготовление.

Считаю, что диссертационная работа Рыбакова И.В. «Физическое обоснование нормально проводящего ускоряющего резонатора для интенсивного линейного ускорителя ионов водорода» является законченным трудом, полностью отражающей первый - обоснование возможности технической реализации. Исследование обеспечивает расширение свободы выбора при реализации установок для экспериментальной физики. Работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Считаю, что ее автор заслуживает ученой степени к.ф.-м.н по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Научный руководитель,  
Д.ф.-м.н, в.н.с. ОУК ИЯИ РАН

09.09.2020 г.

В.В. Парамонов

Подпись Парамонова В.В. удостоверяю,  
Зам. Директора ИЯИ РАН

А.В. Фещенко