

## Отзыв научного руководителя

диссертационного исследования Александра Викторовича Дзюбы на тему «ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РАДИОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ И УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ», представляемого на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 02.00.04 - физическая химия.

Дзюба Александр Викторович проходил обучение в магистратуре НГУ по специальности "Физические методы исследования твердого тела", по окончании которого в 2011 году защитил под моим руководством магистерскую диссертацию. Уже в то время в процессе выполнения квалификационной работы он приступил к исследованиям структурных характеристик сверхпроводящего ниобия применительно к его использованию в качестве материала радиочастотных структур. При этом он проявил исключительную увлеченность данной тематикой, что, наряду с его трудолюбием и творческим потенциалом, позволило мне при обучении его в аспирантуре остановить выбор на указанной выше теме диссертационного исследования. Актуальность этой темы обусловлена тем, что сверхпроводящие радиочастотные структуры используют не только в коллайдерах, предназначенных для физики высоких энергий, но также и в ускорителях, применяемых для решения проблем в науке и сфере производства.

При выполнении диссертационного исследования перед Александром Викторовичем были поставлены следующие важные задачи: определить причины потерь энергии электромагнитных колебаний в стенках ниобиевых резонаторов, попытаться выяснить физический механизм этих потерь, на основе результатов исследований предложить возможные усовершенствования в технологическом процессе изготовления ячеек ускоряющей структуры с целью повышения добротности и темпа ускорения. В случае успешного продвижения в решении этих задач могли бы открыться перспективы экономически оправданному использованию сверхпроводящих ниобиевых структур в ускорителях, предназначенных для широкого круга применений.

Учитывая опыт, накопленный во время обучения в магистратуре, при решении поставленных задач А.В. Дзюба сосредоточился на методах исследований, нацеленных на изучение микроструктуры ниобия. На первом этапе работы он провел тщательный анализ большого массива экспериментальных данных, полученных к тому времени по всем основным лабораториям, занимающимся сверхпроводящими радиочастотными резонаторами. По результатам анализа была предложена модель диссипации энергии электромагнитного поля в результате проникновения в структуру материала вихрей Абрикосова через участки поверхности, имеющие нанометровые локальные

искривления. Это позволило объяснить понижение значения первого критического поля, наблюдаемое на образцах сверхпроводящего ниобия. В рамках модели было показано, что в корректном описании зависимости добротности резонатора от амплитуды колебаний радиочастотного поля необходимо предполагать, что вихри Абрикосова должны проникать в локальные области ниобия, для которых параметр Гинзбурга - Ландау имеет повышенное значение по отношению к чистому, бездефектному материалу.

На втором этапе работ аспирантом были проведены эксперименты с образцами, вырезанными как непосредственно из стенок резонатора, так и листового материала, используемого для изготовления ускорительных ячеек. Проведенное им изучение структуры поверхности методом дифракции обратно-рассеянных электронов показали, что в стенках резонатора присутствуют кластеры дислокаций, распределение которых сильно неравномерно, и это распределение неплохо коррелирует с неоднородностями нагрева стенки резонатора в результате диссипации энергии ВЧ поля. В итоге проведенных исследований аспирант пришел к выводу, что только дислокации с закрепленными на них точечными дефектами, вызывающими понижение критического поля сверхпроводника участвуют в проникновении вихрей Абрикосова. Позднее, поставленный эксперимент по измерению магнитной восприимчивости подтвердил, что потери в ниобии могут быть вызваны присутствием нормально проводящих гидридов, локализованных на этих дефектах. Из эксперимента по измерению электросопротивления выяснилось, что присутствие дислокаций в образце приводит к усиленной абсорбции водорода. Следовательно, небольшие отклонения в технологическом процессе производства ячеек, связанные, например, с неточным управлением температурой отжига или параметрами прокатки и штамповки, могут привести к значительной разнице в концентрации водорода в стенках резонатора после химической полировки, что неминуемо отразится и на достигаемых значениях добротности и ускоряющего напряжения.

На основе результатов своих исследований Александр Викторович предложил новое объяснение влиянию отжига при  $800^{\circ}\text{C}$  на свойства поверхности ниобиевых резонаторов. Процесс отжига обеспечивает не только обычную дегазацию водорода из объема, но также и процесс взаимного уничтожения дислокаций и выхода части дислокаций на поверхность металла, что впоследствии подавляет образование гидридной фазы. Исходя из данного понимания, им был предложен и применен метод предварительного отжига полуячеек, в котором переставлены два главных технологических шага: отжиг и химическая полировка. Предварительные данные ускорительной лаборатории им. Ферми, также как и данные других лабораторий, свидетельствуют о том, что предложенное аспирантом технологическое решение может быть успешно применено. Причем, есть основание надеяться, что с повышением температуры отжига выше  $800^{\circ}\text{C}$  можно

будет несколько увеличить максимальные значения добротности и ускоряющего напряжения.

Таким образом, эксперименты со сверхпроводящими ускоряющими ячейками из ниобия и специально изготовленными контрольными образцами из этого металла, дополненные теоретическим анализом возможного механизма потери энергии радиочастотными колебаниями в стенке сверхпроводящего резонатора, позволили аспиранту успешно решить поставленные перед ним задачи. При этом ему пришлось освоить новую для него область знаний, а именно, 01.04.20 – физику пучков заряженных частиц и ускорительной техники. В рамках оценки работы аспиранта при выполнении диссертационной работе выделю следующее. Представленные в диссертации результаты экспериментов с использованием различных методов исследования твердого тела получены Александром Викторовичем главным образом в условиях самостоятельного выполнения работы. Анализ явлений и физических процессов, которые нашли отражение в тексте диссертации, а также построение физической модели, для объяснения потерь в сверхпроводящем ниобии, были осуществлены им при тесном обсуждении с коллегами. В ходе этих обсуждений Дзюба А.В., как правило, демонстрировал глубокое понимание обсуждаемых вопросов, а достигнутые им результаты свидетельствуют о высоком уровне владения знаниями в различных областях современной физике и умелом их использовании при решении конкретных научно-технических задач. При написании диссертации А.В. Дзюба продемонстрировал способность к глубоким аналитическим рассуждениям, а также к формулированию логически обоснованных выводов. При этом я вынужден отметить некоторые затруднения в использовании им стилистики и грамматики русского языка, что, возможно, связано с его длительным пребыванием в англоязычной среде.

Считаю, что Дзюба А.В. в полной мере сформировался как физик-исследователь. Как соискатель он, несомненно, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 02.00.04 – физическая химия.

Отзыв дан с целью представления документов в диссертационный совет для защиты диссертации.

19 октября 2015 года

Доктор физ.-мат. наук, профессор

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



А.В. Аржанников

А.В. Васильев