

О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук Степанова Альберта Владимировича на диссертацию Гикала Бориса Николаевича «Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для прикладных исследований и промышленного применения», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная и техника

В настоящее время во многих научных лабораториях мира ускорители тяжелых ионов используются для решения наукоемких прикладных задач по модификации полупроводниковых структур, контролю радиационной стойкости конструкционных материалов и компонент электроники, при производстве трековых мембран высокой селективности. В большинстве исследовательских центров программа прикладных работ базируется на использовании уникальных дорогостоящих ускорителях тяжелых ионов, сооруженных для проведения фундаментальных исследований в области ядерной физики.

Поэтому диссертация Б.Н. Гикала, посвященная разработке и сооружению серии экономичных, специализированных циклотронов тяжелых ионов, является, безусловно, актуальной. В работе обоснованы как выбор выходных параметров пучка циклотронов тяжелых ионов, предназначенных для решения прикладных задач, так и принципиальные особенности нового поколения циклотронов, созданных в ЛЯР ОИЯИ под руководством автора.

Известно, что параметры основных узлов циклотронов тяжелых ионов (электромагнит, ускоряющая высокочастотная, вакуумная и другие системы) в решающей степени зависят от используемых источников ионов. При создании циклотронов нового поколения были использованы последние достижения ЛЯР ОИЯИ в области создания ЭЦР источников тяжелых ионов, в том числе, со сверхпроводящими обмотками. Именно применение автономных ЭЦР источников, оборудованных системами аксиальной инжекции пучка в центральную зону электромагнита для последующего ускорения, позволило создать экономичные циклотроны тяжелых ионов. Следует отметить, что предложенная ранее в ЛЯР система аксиальной инжекции пучка ионов на циклотроне У-200 была первой в отечественных научных центрах. Полученные результаты исследований нового способа инжекции являлись основой кандидатской диссертации Гикала Б.Н. и были использованы при модернизации других ускорителей ЛЯР. Кроме использования автономных ЭЦР источников с системами аксиальной инжекции пучка, характерными особенностями всех циклотронов новой серии является размещение дуантов в «долинах» магнитной структуры и использование электростатической системы выпуска пучка на удаленные мишени. Автор убедительно доказал, что только в таком наборе основных параметров возможно создание экономичных, надежных, сильноточных циклотронов тяжелых ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон и с большими потенциальными возможностями.

Преимущество нового подхода к созданию циклотронов тяжелых ионов особенно ярко проявился при выполнении проекта глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона ИЦ-100, где произведен переход от внутреннего источника ионов типа РIG к ЭЦР источнику с системой аксиальной инжекции. С внутренним источником диапазон ускоряемых ионов был ограничен аргоном. После модернизации циклотрона были получены пучки ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама, ускоренные до энергии 1-1,2 МэВ/нуклон. В результате проведенных на циклотроне экспериментальных работ были сформулированы требования к выходным параметрам пучков тяжелых ионов, предназначенных для проведения

прикладных исследований и промышленного применения. Одновременно прошли экспериментальную проверку используемые методы анализа динамики пучка в реальных магнитных и расчетных электрических полях сложной формы.

В Лаборатории ядерных реакций был разработан и создан специализированный циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 с плавным регулированием энергии для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Комплекс введен в эксплуатацию в научно-исследовательском центре при Университете им. Л.Н.Гумилева в Астане (Казахстан). Циклотрон ДЦ-60, входящий в состав комплекса, отличается большими возможностями проведения широкого круга научных и прикладных исследований. Важным преимуществом циклотрона является возможность оперативного регулирования типа ускоряемых тяжелых ионов (от лития до ксенона с $A/Z = 5,7-12$) в широком диапазоне энергий от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. В настоящее время на пучках циклотрона ведутся прикладные исследования. Студенты и аспиранты проходят на циклотроне обучение путем непосредственного участия в реальных экспериментах с пучками ускоренных тяжелых ионов.

В диссертации представлен реализованный проект ускорительного комплекса ДЦ-110 для использования в промышленности. Циклотрон разработан для ускорения ионов аргона, криптона и ксенона с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон и высокой интенсивностью пучка, свыше 10 мкА. Циклотрон введен в эксплуатацию и отличается высокой надежностью и эффективностью. Более 30% инжектированного пучка из источника попадает на мишень, что является рекордным показателем для циклотронов тяжелых ионов. Ускоритель способен облучать более 2 миллионов квадратных метров в год полимерной пленки для изготовления трековых мембран. Разработанный в ЛЯР циклотронный комплекс ДЦ-110 вошел в состав научно-промышленного центра «БЕТА», созданного для производства каскадных плазмаферезаторов крови на основе технологии трековых мембран и, безусловно, может считаться базовым проектом при создании подобных машин для промышленного использования.

С научной точки зрения наибольший интерес представляет комплекс расчетных работ по сквозному расчету динамики пучка в циклотроне от внешнего источника ионов до мишени. Анализ динамики пучка в процессе ускорения проводился современными методами с использованием результатов измерений реальных магнитных полей и расчетов трехмерных электрических полей. На всех этапах ускорения проводились оценки потерь пучка, вызываемых разными причинами. В таком завершенном виде расчетный комплекс по динамике пучка в циклотроне впервые представлен в практике сооружения отечественных циклотронов. Полученные расчетные данные получили полное подтверждение в результате широкомасштабных экспериментальных проверок.

Личный вклад автора является основным на всех этапах разработки, начиная от постановки задач, обоснования методик расчета, проведения расчетов и анализа их результатов, вплоть до практического применения.

Замечаний по тексту диссертации нет. Конечно, для потенциальных Заказчиков представляет интерес информация об эксплуатационных характеристиках циклотронов и о требуемых помещениях для размещения оборудования. Но, скорее всего, в диссертации эти данные приводить не обязательно, т.к. они будут содержаться в коммерческих предложениях на поставку циклотронов.

Для лучшего понимания некоторых положений диссертации имеется несколько вопросов.

Прежде всего, каков качественный уровень ЭЦР источников ЛЯР ОИЯИ по сравнению с аналогичными зарубежными ЭЦР источниками, которые можно приобрести коммерческим путем? Нельзя ли, закупая ЭЦР источники зарубежных фирм, снизить себестоимость изготовления циклотронов, например, за счет выбора электромагнита с меньшим параметром энергии?

В диссертации нет упоминаний о методике магнитных измерений. Это важная часть работ по созданию циклотронов. Какова точность измерений магнитного поля, каков объем этих измерений и в каком виде данные магнитных измерений (массив или аналитика) использовались при проведении расчетов по динамике пучка?

Переходя к общей оценке диссертации Б.Н. Гикала, следует отметить, что она является законченной научной работой, в которой автором обосновано решение ряда принципиально новых научно-технических проблем. Совокупность работ автора можно квалифицировать как крупный вклад в развитие ускорительной техники, в частности, в создание специализированных, экономичных циклотронов тяжелых ионов. Создание циклотронов тяжелых ионов, в свою очередь, является существенным вкладом в промышленное внедрение инновационных нанотехнологий.

Под научным руководством автора в диапазоне энергий 0,35-2,5 МэВ/нуклон для ионов в интервале A/Z от 5,3 до 12 разработана и введена в эксплуатацию серия циклотронов тяжелых ионов, имеющих научное и прикладное применение. Циклотроны характеризуются рекордной интенсивностью пучка и оснащены разнообразными каналами транспортировки пучков к внешним мишеням для научных исследований и прикладных целей. Наибольший практический интерес представляет канал, оборудованный выходным устройством облучения полимерных пленок, используемых для изготовления селективных трековых мембран («ядерных фильтров»). Создание комплексов, содержащих специализированные циклотроны с устройствами облучения пленок, может рассматриваться как решение важной народно-хозяйственной задачи по организации масштабного производства микрофильтров, которые находят широкое применение в промышленности и в медицине, а также имеют высокий экспортный потенциал.

Все материалы диссертации опубликованы в авторитетных научных изданиях и журналах по списку ВАК. Они неоднократно представлялись Гикалом Б.Н в виде приглашенных докладов на российских и международных конференциях.

Диссертация Б.Н.Гикала «Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для прикладных исследований и промышленного применения», удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Борис Николаевич Гикал, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент, доктор технических наук,
главный специалист по циклотронной тематике,
НИИЭФА им. Д.В. Ефремова

 А.В. Степанов

« 10 » апр. 2014

Подпись А.В. Степанова удостоверяю.
Секретарь Ученого совета
ОАО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова»
доктор технических наук, профессор



 Г.Л. Саксаганский

« 15 » апр 2014