

О Т З Ы В

официального оппонента 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 техника.

Диссертация Гикала Б.Н. посвящена актуальной задаче созданию специализированных ускорителей тяжелых ионов, позволяющих внедрять новые пучковые технологии путем прямого применения ускорителей в технологических процессах. Исследования механизмов взаимодействия тяжелых ионов с различными материалами, лежат в основе новых технологий промышленного применения. Большинство работ в этой области выполнены на ускорителях, разработанных, прежде всего для фундаментальных исследований. Широкое применение новых технологий в промышленности требует создания специализированных ускорителей, удовлетворяющих требованиям к установкам промышленного производства по надежности, стабильности, сервисному обслуживанию.

В диссертационной работе приводятся основные принципы проектирования и создания специализированных циклотронов, созданных в ЛЯР ОИЯИ для прикладных задач. В неё вошел цикл работ, выполненных и опубликованных автором с 1982 г. и до настоящего времени.

Целью диссертационной работы являлось:

- разработка физических принципов и технических решений для создания специализированных циклотронов тяжелых ионов нового поколения с системой аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР для исследований и промышленного применения в области нанотехнологий с использованием пучков ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон;
- разработка базовой конструкции системы аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон из внешнего источника;
- разработка и выполнение проекта глубокой модернизации циклического имплантатора ИЦ-100 путем создания системы аксиальной инжекции пучка из внешнего источника ионов электронно-циклотронного резонанса, реконструкции всех систем циклотрона в соответствии с новой концепцией, получение пучков ионов от Ne до W с энергией около 1 МэВ/нуклон;
- создание специализированных циклотронных комплексов ДЦ-60 и ДЦ-110 для проведения исследований в области нанотехнологий и производства трековых мембран.

Научная новизна и практическая ценность работы заключается в разработке концепции нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов на энергию до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции пучка из внешних ЭЦР источников ионов. Разработана базовая конструкция системы аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, которая впервые в отечественных центрах была создана на циклотроне У-200 ЛЯР и стала концептуальным решением для разработки подобных систем на других ускорителях такого типа. На основе новой концепции проектирования циклотронов выполнен проект глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона тяжелых ионов для прикладных задач ИЦ-100, в результате которого произведен переход от внутреннего РИГ источника ионов к системе инжекции из внешнего ЭЦР источника и расширен диапазон ускоряемых ионов от Ag до Kr, I, Xe, W. Впервые разработан и создан циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 с плавной вариацией энергии ускоренных ионов в диапазоне от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон для использования в качестве базовой установки для научно-исследовательских центров при Университетах. Циклотронный комплекс оснащен физическими установками и необходимым инженерным оборудованием, обеспечивающим автономную работу ускорителя. Разработан и создан специализированный высокоинтенсивный циклотрон ДЦ-110 промышленного назначения, предназначенный для ускорения ионов Ag, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью пучка свыше 10 мкА. Ускоритель способен облучать более 2 миллионов квадратных метров в год полимерной пленки для изготовления трековых мембран.

Все разработки, изложенные в диссертации, нашли практическое применение:

1. На циклотроне У-200 ЛЯР создана система аксиальной инжекции пучка, которая послужила базовой конструкцией при создании подобных систем на циклотронах У-400, МЦ-400, ИЦ-110, ДЦ-60 и ДЦ-110.
2. Выполнена глубокая модернизация циклического имплантатора ИЦ-100, на котором ведутся прикладные исследования и облучение полимерной пленки.
3. Разработанный в ЛЯР циклотронный комплекс ДЦ-60 установлен в научно-исследовательском центре МНИК при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева, г.Астана, Казахстан. На комплексе ведутся прикладные исследования, обучаются студенты и аспиранты. Налажено серийное облучение полимерной пленки для производства трековых мембран.

4. Циклотронный комплекс ДЦ-110 установлен и запущен в эксплуатацию в НПК «БЕТА» (г. Дубна, Россия). Циклотрон используется на стадии облучения полимерной пленки в технологическом процессе производства плазмаферезаторов крови.

Структурно текст диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения, материал диссертации изложен понятным техническим языком.

В **1-й главе** приводится краткий обзор существующих ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации полимеров. Приводится анализ тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов в мире.

Создание инжектора тяжелых ионов на базе ЭЦР источника и системы внешней инжекции пучка серьезным образом повлияло на принципы построения циклотронов, в том числе специально разработанных для прикладных задач и промышленного использования.

Во-первых, появилась возможность ускорения ионов с более высоким зарядом, что позволило снизить уровень среднего магнитного поля, создавать более экономичные магниты.

Во-вторых, значительно снизилась газовая нагрузка на вакуумную систему циклотрона.

В-третьих, новые технологии существенно изменили эксплуатационные свойства ускорителя. Снизилась вероятность пробоев с высоковольтных электродов и дуантов, в несколько раз увеличился срок службы изоляторов ввода высокочастотной мощности. Срок службы элементов центральной оптики стал практически не ограничен.

В-четвертых, система аксиальной инжекции пучка дала возможность более эффективно использовать пучок за счет применения банчера, позволившего увеличить захват частиц в процесс ускорения до 30-70%. Система аксиальной инжекции позволила применить чоппер для быстрого прерывания процесса ускорения – менее 0,1 мс, что полезно во многих физических экспериментах.

Таким образом, циклотрон тяжелых ионов с системой аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника приобрел свойства технологической машины промышленного применения. Все эти преимущества были успешно использованы в проектах циклотронов ЛЯР.

Во **2-й главе** изложена концепция проектирования циклотронов тяжелых ионов для прикладных задач и промышленного применения с системой аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника, разработанная в ЛЯР ОИЯИ. Показаны способы расчета и критерии выбора основных параметров систем циклотрона: канала инжекции пучка,

магнитной структуры циклотрона, высокочастотной ускоряющей системы, системы вывода пучка из ускорителя, каналов транспортировки ускоренного пучка и требований к инженерным системам циклотрона.

В **3-й главе** представлен проект глубокой модернизации циклического имплантатора ИЦ-100 – первого в мире специализированного ускорителя тяжелых ионов, созданного для промышленного производства трековых мембран. ИЦ-100 был разработан в 1985 году в ЛЯР ОИЯИ. Циклотрон был оснащен внутренним РИГ источником ионов, который определял диапазон ускоряемых ионов от $^{12}\text{C}^{+2}$ до $^{40}\text{Ar}^{+7}$. После проведенной модернизации на циклотронном комплексе ИЦ-100 были получены интенсивные пучки тяжелых ионов Ne, Ar, Fe, Kr, Xe, I, W с энергией около 1-1,2 МэВ/нуклон.

Для получения тяжелых ионов в заданном диапазоне отношения массы к заряду ($A/Z=5,3\div 6,0$) был создан сверхпроводящий ЭЦР источник ионов с уровнем аксиального магнитного поля до 3 Тл и частотой СВЧ нагрева плазмы 18 ГГц.

В **4-й главе** дано описание специализированного комплекса ДЦ-60, разработанного и созданного в ЛЯР ОИЯИ для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева, г.Астана, Казахстан. Циклотрон ДЦ-60 предназначен для ускорения интенсивных пучков тяжелых ионов от Li до Xe с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон.

На циклотроне установлен ЭЦР источник ионов с рабочей частотой 14 ГГц, созданы система аксиальной инжекции и канал пучков ионов низкой энергии от 10 до 25 кВ×заряд, получаемых из источника.

В системе транспортировки ускоренных пучков предусмотрен специализированный канал и установка для облучения полимерной пленки. Качество облучения и производительность установки полностью удовлетворяет условиям промышленного производства трековых мембран. Высокая интенсивность пучка ионов позволяет применять систему стабилизации тока пучка на мишени с большой глубиной регулировки.

5-я глава посвящена проекту нового циклотрона ДЦ-110, который является продолжением развиваемого в ЛЯР направления по созданию специализированных ускорителей для промышленного применения и прикладных исследований. Циклотрон ДЦ-110 разработан для научно-промышленного комплекса «БЕТА». В основу проекта ДЦ-110 легли научные и инженерные решения, разработанные в ходе эксплуатации циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60, У-400, У-400М, а также новые разработки, значительно расширяющие возможности циклотрона для прикладных задач.

Циклотронный комплекс ДЦ-110 включает в себя компактный циклотрон тяжелых ионов, инжектор многозарядных ионов на базе ЭЦР источника (18 ГГц) и все инженерные

системы, обеспечивающие полный цикл облучения полимерной пленки – первой стадии технологии изготовления трековых мембран. ДЦ-110 производит интенсивные пучки ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, что позволяет производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые полностью соответствуют поставленной в диссертации цели:

- Разработана концепция проектирования нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов на энергию до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции из внешних источников ионов типа ЭЦР.
- Создана система базовая конструкция аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон.
- Выполнен проект глубокой модернизации циклотрона ИЦ-100. Созданы специализированные циклотронные комплексы тяжелых ионов ДЦ-60 и ДЦ-110 для прикладных исследований и промышленного применения.

На всех установках, представленных в диссертации, были достигнуты проектные параметры.

Диссертация Гикала Б.Н. включает в себя большое количество рисунков, которые хорошо отражают полученные результаты, о облегчают понимание изложенного материала.

В качестве замечаний к диссертации следует отметить встречающиеся опечатки, английский текст в рисунках, на графиках не часто можно увидеть ошибку измерения, используется двойная терминология, например для описания процесса группировки пучка используется термин «банчировка». В диссертации говорится о широкой программе прикладных исследований, выполняемой на созданных циклотронах, ссылки даны в основном на результаты, полученные на установке ИЦ-100 и гораздо меньше работ, выполненных на ДЦ-60 и ДЦ-110. Следовало бы отметить в тексте диссертации факт, что целевая программа, выполненная в ЛЯР ОИЯИ, по разработке и созданию серии циклотронов тяжелых ионов прикладного применения является единственной в мире.

Сделанные в отзыве замечания не снижают общей высокой оценки научного уровня работы и значимости полученных результатов.

Представленная диссертация является завершённым циклом научных исследований на актуальную тему создания ускорителей прикладного применения для использования ядерно-физических методов в промышленных процессах. Автореферат полностью отражает основные результаты диссертации.

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в виде препринтов ОИЯИ, в журналах ЖТЭФ, «Nucl. Phys.», «Письма в ЭЧАЯ», «Атомная энергия», ПТЭ, в трудах российских и международных конференций:

Общее число публикаций по теме диссертации 69 из них в рецензируемых журналах – 19 в трудах российских и международных конференций – 27, получен один патент на изобретение.

Гикал Б.Н. является известным специалистом в области физики циклотронов, он входит в состав Научного Совета РАН по проблеме ускорителей заряженных частиц.

Диссертационная работа Гикала Бориса Николаевича «Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для прикладных исследований и промышленного применения», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК Российской Федерации. Автор диссертации Гикал Борис Николаевич заслуживает присвоения ему степени доктора технических наук.

Заместитель директора ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»

Доктор физ.- мат. наук



Голубев А. А.

«29» 04 2014